

Programme de recherche sur les politiques de sécurité alimentaire au Mali

REPONSE DU RENDEMENT DES CEREALES SECHES DU MALI AUX ENGRAIS: UN ECLAIRAGE A PARTIR DES DONNEES D'ENQUETE AUPRES DES MENAGES

Auteurs

Hamza Haider, Melinda Smale et Véronique Thériault



Articles de recherche sur la politique de sécurité alimentaire

Cette série d'articles est conçue pour diffuser en temps opportun les résultats d'analyses stratégiques et de recherche générés par le laboratoire d'innovation sur la sécurité alimentaire (FSP) à travers l'initiative Feed the Future financée par l'USAID et ses associés. Le projet du FSP est géré par le Food Security Group (FSG) du Département de l'agriculture, de l'alimentation et de l'économie des ressources (AFRE) de l'Université d'État du Michigan (MSU), et mis en œuvre en partenariat avec l'Institut international de recherche sur les politiques agricoles (IFPRI) et l'Université de Pretoria (UP). Ce consortium MSU-IFPRI-UP travaille en collaboration avec les gouvernements, les chercheurs et les acteurs du secteur privé dans les pays d'Afrique et d'Asie cibles de l'initiative Feed The Future afin d'accroître la productivité agricole, améliorer la diversité alimentaire et renforcer la résilience face à des défis comme le changement climatique qui affectent les moyens de subsistance.

Les articles s'adressent aux chercheurs, aux décideurs, aux organismes donateurs, aux éducateurs et aux praticiens du développement international. Les articles sélectionnés seront traduits en français, en portugais ou autres langues.

Des copies de tous les articles de recherche du FSP et des mémoires politiques peuvent être téléchargées gratuitement en format PDF à partir du site Web suivant: www.foodsecuritylab.msu.edu

Des copies de tous les articles et mémoires du FSP sont également soumises à la Maison d'échange de l'expérience de développement de l'USAID (DEC) à: <http://dec.usaid.gov/>

AUTEURS

Hamza Haider (haidersh@bu.edu) est candidat au doctorat au département de l'agriculture, de l'alimentation et de l'économie des ressources, Michigan State University, East Lansing, MI, USA.

Melinda Smale (msmale@msu.edu) est professeur de développement international au Département de l'économie agricole, de l'alimentation et des ressources, MI State University (MSU), East Lansing, MI, États-Unis.

Véronique Thériault (theria13@anr.msu.edu) est professeur adjointe de développement international au département de l'agriculture, de l'alimentation et de l'économie des ressources, Michigan State University, East Lansing, MI, USA.

Michigan State University (MSU). Établie en 1855, MSU est la plus ancienne des universités américaines Land Grant et possède une longue histoire de recherche sur les politiques agricoles et alimentaires en Afrique, en Asie et en Amérique latine.

Ces travaux de recherche ont été réalisés grâce au soutien généreux du peuple américain à travers l'Agence Américaine pour le Développement International (USAID) dans le cadre de l'initiative intitulée « Feed the Future ». Les auteurs assument totalement la responsabilité du contenu de cette étude qui ne reflète point les opinions de l'USAID ni du Gouvernement américain.

Copyright © 2018, Michigan State University. Tous droits réservés. Ce document peut être reproduit pour utilisation à des fins personnelles ou dans le cadre d'activités à but non lucratif sans la permission de MSU mais ce dernier doit être mentionné.

Publié par le Département d'économie agricole, alimentaire et des ressources naturelles,

Résumé

Au Mali, plus de 60% de la population vit en milieu rural et environ la moitié d'entre elle vit en dessous du seuil de pauvreté (Banque mondiale 2017). Étant donné que la majorité des populations rurales dépendent de l'agriculture comme principal moyen de subsistance, augmenter la productivité agricole est essentielle pour réduire la pauvreté. Cet article explore l'efficacité de l'engrais azoté pour l'augmentation des rendements des céréales sèches.

En utilisant le LSMS-ISA et un ensemble de données de la Savane soudanienne, une simple analyse économétrique suggère que l'utilisation d'engrais azotés a peu d'effet sur le rendement des cultures. Cependant, lorsque nous prenons en compte l'endogénéité de l'utilisation d'engrais, nous trouvons des taux de réponse du rendement qui se situent dans la marge indiquée dans la littérature. Comme prévu, la réponse des rendements de sorgho aux engrais est plus faible que celle des rendements du maïs. Les réponses du rendement des céréales sèches aux engrais sont plus fortes dans la Savane soudanienne (échantillon) que dans l'ensemble du pays (ensemble de données représentatives du niveau national), soulignant ainsi l'importance des facteurs agro-écologiques et du système agricole. La texture du sol et ses méthodes de gestion (structures anti-érosion) affectent à la fois les rendements et les effets estimés des engrais. Nous trouvons également que le phosphore est une contrainte qui pèse sur l'amélioration de la productivité agricole. Bien que la littérature mette principalement l'accent sur la compréhension de l'utilisation des engrais azotés, il est essentiel de promouvoir une utilisation équilibrée des engrais afin de permettre la disponibilité d'autres éléments nutritifs complémentaires dans le sol.

Table de Matières

Tableaux et Figures.....	vi
1. Introduction	1
2. Méthodes	3
2.1 Les sources de données	3
2.2 Approche économétrique	4
2.3 Variables	7
3 Résultats.....	9
3.1 Descriptives.....	9
3.2 Fonctions de réponse de rendement	10
4 Conclusions	15
Références	Error! Bookmark not defined.
Annexe 1: Tri des données du LSMS	40
Annexe 2: Figures et tableaux supplémentaires.....	42
Annexe 3: Protocole d'échantillonnage de sol pour la représentation de parcelles entières pour les petites exploitations	1

Tableaux et Figures

Tableau 1	Statistiques descriptives, données du LSMS-ISA	17
Tableau 2	Statistiques descriptives, données de la Savane soudanienne.....	18
Tableau 3	Répartition de l'échantillon analytique du LSMS par région et par culture	19
Tableau 4	Taux d'utilisation moyen de N, comparé aux optima économiques recommandés, par région et par culture.....	20
Tableau 5	Réponse de rendement des céréales des terres arides à l'engrais azoté appliqué, modèle d'effets fixes sur les des ménages.....	21
Tableau 6	Réponse de rendement des céréales des terres arides à l'engrais azoté appliqué, modèle d'effets fixes sur les ménages.....	22
Tableau 7	Réponse de rendement des céréales des terres arides à l'engrais azoté appliqué, modèle d'effets fixes sur les ménages.....	23
Tableau 8	Réponse de rendement de sorgho à l'engrais azoté appliqué, modèle des ménages à effets fixes.....	24
Tableau 9	Réponse de rendement des céréales des terres arides à l'engrais azoté appliqué, modèle d'effets fixes sur les ménages.....	25
Tableau 10	Rendement du maïs / sorgho incluant les éléments nutritifs mesurés dans le sol, Savane soudanienne.....	26
Tableau 11	Rendement du maïs-sorgho, y compris le type de sol perçu par les agriculteurs, Savane soudanienne.....	28
Tableau 12	Réponse de rendement du maïs-sorgho à l'azote appliqué, Approche de la fonction de contrôle.....	30
Tableau 13	Structures ministérielles impliquées dans le contrôle et la réglementation des pesticides.....	39
Figure 1a	Zones agro-écologiques et capitales régionales du Mali	15
Figure 1b	Enquête dans les villages de la Savane soudanienne, des zones agro-écologiques et de l'isohyète 800 mm.....	16

1. Introduction

Au Mali, plus de 60% de la population vit en milieu rural et environ la moitié d'entre elle vit en-dessous du seuil de pauvreté (Banque mondiale 2017). La plupart des gens en milieu rural dépend de l'agriculture comme principal moyen de subsistance. Les céréales sèches telles que le maïs, le mil et le sorgho représentent entre deux tiers et trois quarts des terres cultivées, selon les années. Au cours des dernières décennies, la production de céréales sèches a augmenté principalement grâce à l'extension de la superficie cultivée plutôt qu'à l'intensification, ce qui n'est pas durable. Malgré la diffusion continue de variétés améliorées, les rendements de mil et de sorgho ont stagné, les moyennes nationales se situant en dessous de 1 tonne/ha. Pendant ce temps, les rendements moyens nationaux de maïs générés sur une période de trois ans ont augmenté, passant de 1,3 tonnes /ha de 2001 à 2003 à 2,5 tonnes/ha de 2015 à 2017 [AL1] (<http://www.fao.org/faostat/en/#data/QC>). Le Mali est le troisième producteur de maïs d'Afrique de l'Ouest, bien qu'il occupe la cinquième place en termes de superficie récoltée, avec des rendements moyens les plus élevés parmi les 15 pays producteurs de maïs de la région (Abate et al. 2015). Néanmoins, comme cela est courant dans toute l'Afrique subsaharienne, les maxima de rendements obtenus pour les variétés de maïs améliorées par les agriculteurs restent nettement inférieurs à leur potentiel de rendement selon les conditions expérimentales (4-6 tonnes/ha selon Coulibaly 2008; Macauley et Ramadjita 2015), compte tenu des défis posés par les conditions agricoles et par la faiblesse des marchés des intrants.

L'utilisation inadéquate d'engrais minéraux a souvent été identifiée comme une cause de la stagnation de la productivité des céréales sèches en Afrique subsaharienne (NEPAD 2003: 47). En 2008, le gouvernement malien a décidé de rétablir un programme de subventions aux intrants dans le but de stimuler la productivité céréalière grâce à un meilleur accès aux engrais, tout en contribuant à la sécurité alimentaire et nutritionnelle grâce à des revenus plus élevés et à des prix à la consommation plus faibles (Kone 2016; Smale, Diakité et Keita 2012). Les subventions aux engrais constituent désormais la catégorie de dépenses la plus importante, représentant environ 25% des dépenses publiques consacrées au développement rural (Theriault, Smale et Assima à paraître). Étant donné que de très petites quantités d'engrais sont actuellement utilisées sur le sorgho ou le mil, nous ne pensons pas que le programme de subvention des engrais aura un effet généralisé sur les décisions de production à l'échelle nationale. Cependant, Theriault, Smale et Assima (à paraître) ont constaté un impact significatif sur l'utilisation des engrais et les rendements du sorgho et du maïs dans la Savane soudanienne, une région propice à l'agriculture. Une critique plus virulente de la politique concernant les engrais minéraux est que les sols du Mali sont généralement déficients en éléments nutritifs spécifiques et que la matière organique du sol est nécessaire pour une intégration efficace desdits éléments nutritifs (Dicko et al. Haggblade et al. 2014). Des pertes à long terme dues à l'érosion des sols ont été documentées (Bishop et Allen, 1989), bien qu'elles aient été compensées dans certaines zones par des programmes de gestion des ressources efficaces (par exemple, Tappan et McGahuey, 2007).

Malgré la priorité donnée par les politiques aux engrais minéraux, peu d'études ont systématiquement examiné la réponse aux engrais du rendement des céréales au Mali, ce qui est

fondamental pour évaluer les impacts du programme. Une exception importante est l'analyse des données expérimentales agricoles de Dicko et al. (2016), qui ont estimé les fonctions de réponse pour l'azote (N), le phosphore (P) et le potassium (K) sur le maïs, le riz et le mil à travers les quatre zones agro-écologiques maliennes. En général, les auteurs ont constaté que les optima économiques des taux d'application d'éléments fertilisants différaient des taux d'application recommandés qui restent uniformes dans tout le pays et ne varient que par type de culture.

A notre connaissance, seules deux autres études abordent la productivité des céréales en zones arides au Mali, qui utilisent toutes les deux des données collectées dans des enquêtes auprès des ménages agricoles plutôt que dans les conditions expérimentales. En utilisant les données de panel de ménages agricoles portant sur une période de 12 ans (1994-2006) collectées dans la région de Sikasso au Mali, Foltz et al. (2015) ont trouvé une réponse fortement significative des rendements de maïs à l'engrais, concluant que l'utilisation croissante d'engrais avait entraîné la majeure partie de la hausse de productivité du maïs. Sikasso est une région à fort potentiel de productivité pour le maïs, où il est cultivé en rotation avec le coton. En appliquant la méthode de frontière de production stochastique aux données représentatives nationales de l'Enquête intégrée sur la mesure du niveau de vie et l'agriculture (LSMS-ISA), Ahmed, Gaskell et Gautam (2017) n'ont pas trouvé de réponse significative des rendements aux engrais ni à travers les cultures, ni à travers les régions. Nous n'avons connaissance d'aucune analyse publiée sur la réponse aux engrais du rendement de sorgho ou de mil utilisant des données de ménages agricoles.

Nous contribuons ainsi à une littérature sporadique en estimant les fonctions de réponse des céréales sèches (maïs, mil et sorgho) grâce à deux ensembles de données d'enquête sur les ménages agricoles. Le premier, l'enquête *Living Standards Measurement Survey-Integrated Survey of Agriculture (LSMS-ISA)*, est représentatif du territoire national et comprend des informations sur les trois cultures (sorgho, mil, maïs). Le deuxième, collecté par une équipe de chercheurs de l'Institut d'Economie Rurale, uniquement dans la Savane soudanienne, a mis l'accent sur le sorgho et le maïs. Ces deux ensembles de données ont été collectés pendant la saison agricole 2014/2015. Pour estimer nos fonctions de réponse au rendement, nous utilisons une combinaison d'approches économétriques pour comparer et vérifier la robustesse de nos résultats.

Lors de l'analyse des données LSMS-ISA représentatives du territoire national, nous trouvons des effets significatifs, mais mineurs, de l'azote sur les rendements céréales sèches. Dans l'échantillon recueilli dans une zone géographique plus petite de la Savane soudanienne, les taux de réponse à l'azote du sorgho et du maïs sont plus importants. Cela met en évidence l'hétérogénéité des réponses du rendement du maïs aux engrais dans les zones agro-écologiques / systèmes agricoles. Les produits marginaux estimés se situent dans la marge citée dans la littérature existante pour l'Afrique de l'Ouest (Theriault, Smale et Haider 2017; Koussombe et Nauges 2017), mais ils sont inférieurs à ceux cités pour l'Afrique orientale et australe (Sheahan et al. 2013; Marenja and Barrett 2009; Xu et al. 2009). Dans l'analyse des données de la Savane soudanienne, le phosphore s'avère constituer un obstacle majeur.

2. Méthodes

2.1 Sources de données

Premièrement, nous utilisons les données de l'enquête *Living Standards Measurement Survey-Integrated Survey of Agriculture (LSMS-ISA)*, qui a été menée au Mali en deux vagues au cours de la saison agricole 2014-15. Des données récapitulatives sur l'enquête sont fournies dans un document préparé par l'Unité de la planification et des statistiques (2016). Avec une probabilité de sélection proportionnelle à la taille de la population du recensement démographique de 2009, l'échantillon statistique est représentatif à l'échelle nationale des zones rurales et urbaines, la région de Kidal ayant été exclue. La taille totale de l'échantillon était limitée par l'incapacité de collecter des données dans certaines régions en raison de l'insécurité politique, les pertes d'échantillons les plus importantes ayant été enregistrées dans les régions de Mopti, Tombouctou et Gao. L'échantillon final comprend un total d'environ 3 804 ménages contre 4 218 initialement prévus. Le nombre de sections d'énumération standard (SE ou grappes) était de 1070, dont 80% en zone rurale, avec 2 à 3 ménages par grappe. En comparaison des enquêtes LSMS portant sur la consommation des ménages, les dépenses et les revenus, l'enquête LSMS-ISA contient également des données sur l'utilisation d'intrants et la production agricole collectées au niveau des parcelles. Un tiers de toutes les parcelles inventoriées par les ménages de chaque section d'énumération ont été tirées au hasard après avoir été regroupées par culture et association de cultures¹. Cette procédure était nécessaire étant donné qu'au Mali, un grand nombre de parcelles peuvent être cultivées simultanément par plusieurs exploitations familiales, augmentant ainsi la charge de travail du répondant et les coûts de l'enquête.

Notre analyse ne porte que sur les données des principales régions agricoles rurales du Mali, à l'exception de Tombouctou, Gao, et sur quelques observations aux alentours Bamako. Notre échantillon analytique couvre donc les régions de Kayes, Koulikoro, Sikasso, Ségou et Mopti. La figure 1a illustre la dispersion de l'échantillon entre zones agro-écologiques et systèmes agricoles. Compte tenu de l'ampleur de cette enquête menée dans des conditions logistiques difficiles, nous avons rencontré un certain nombre d'obstacles au niveau des données. L'apurement des données est décrit dans l'annexe.

La deuxième source de données est une étude de cas, entreprise dans la zone de production du sorgho du Mali, que nous utilisons à titre de comparaison car elle est plus axée sur un système agricole spécifique (Figure 1b). Les détails de l'enquête sont fournis dans Smale et al. (2015) et Assima et al. (2017). L'échantillon a été tiré d'un recensement de base de tous les ménages producteurs de sorgho de 58 villages situés dans les cercles de Kati, Dioila (région de Koulikoro) et Koutiala (région de Sikasso) dans la Savane soudanienne, dans l'isohyète 800 mm. Les villages recensés comprenaient tous ceux comptant moins de 1 000 résidents et étant répertoriés comme sites de mise en œuvre d'activités du programme de recherche national et des

¹ Comm. pers. Assitan Traoré, Cellule de Planification Cellule de Planification et de Statistiques du Secteur Développement Rural (CPS/SDR), comm pers., 15 Juin 2017 et 15 Novembre 2017.

associations d'agriculteurs depuis 2009. L'enquête à plusieurs passages a été menée en quatre passages, d'août 2014 à juin 2015, par une équipe d'enquêteurs expérimentés recrutés par l'Institut d'économie rurale. Le modèle représente ici des zones de la Savane soudanienne peu exposées aux activités de vulgarisation de la recherche agricole. Pour les céréales, de nombreux producteurs de sorgho cultivent également du maïs et du mil dans cette région mais en raison de contraintes budgétaires, des informations détaillées sur les parcelles ont été collectées uniquement pour le sorgho et le maïs.

L'échantillon de ménages, qui a fait l'objet d'un tirage aléatoire simple, a été majoré de 5% pour tenir compte d'éventuelles non réponses, ce qui donne un total de 623 ménages et un taux de sondage global de 25%. Les enquêteurs ont recensé toutes les parcelles exploitées par chaque ménage échantillonné. Une parcelle par type de culture et par type de gestion a fait l'objet d'un tirage aléatoire par ménage. L'échantillon analytique total utilisé ici après élimination des valeurs aberrantes sur le rendement et sur l'utilisation d'engrais comprend 1 086 parcelles, dont 421 parcelles de sorgho et 665 parcelles de maïs.

Outre les données des enquêtes auprès des ménages, cet ensemble de données comprend des indicateurs d'éléments nutritifs du sol mesurés lors de tests en laboratoire sur des échantillons de sol effectués par l'Institut d'Economie Rurale, Sotuba, Mali. Des échantillons n'ont pas pu être collectés dans toutes les parcelles de sorgho et de maïs en raison de contraintes budgétaires. Les parcelles ont été sous-échantillonnées au hasard en fonction de type de cultures (sorgho, maïs) et de type de gestion des parcelles (collectives, individuelles). Les échantillons de sol ont été prélevés après la récolte en suivant un protocole standard comprenant 8 sous-échantillons par parcelle, collectés selon un schéma en zigzag, afin de garantir une représentation globale de la parcelle (voir annexe 2). Les analyses de laboratoire ont suivi Sparks et al. (1996). L'échantillon analytique pour les éléments nutritifs du sol est constitué de 643 parcelles.

Les données sur les précipitations ont été téléchargées et compilées à partir du site de ressources climatologiques pour l'agro-climatologie de l'Administration nationale de l'air et de l'espace².

2.2 Approche économétrique

Notre objectif est de quantifier l'effet de l'utilisation d'engrais sur les rendements des cultures céréales sèches à l'aide des données d'enquêtes auprès des ménages. Pour ce faire, nous estimons le modèle de réponse du rendement:

$$Y_i = \beta_1 F_i + \beta_2 I_i + \gamma X_i + \varepsilon_i \quad (1)$$

² Accessible à l'adresse suivante : <http://power.larc.nasa.gov/cgi-bin/cgiwrap/solar/agro.cgi?email=agroclim@larc.nasa.gov>

Le modèle est estimé par des régressions effectuées au niveau de la parcelle, où la variable dépendante Y_i indique le rendement de culture (kg/ha). La principale variable explicative est F_i , la quantité d'engrais appliquée sur la parcelle i . Par conséquent, le principal coefficient qui nous intéresse est β_1 . La quantité d'engrais est mesurée en kg/ha d'azote afin de standardiser différents types d'engrais. La variable engrais azoté est créée en additionnant les teneurs en azote de l'urée (46%), du NPK (14%), du DAP (18%) et des autres engrais (16,5%) appliqués sur cette parcelle.

Outre les engrais, les intrants agricoles I sont également utilisés sur les parcelles et sont généralement inclus dans les fonctions de réponse au rendement estimées à l'aide de données expérimentales ou données d'enquêtes. La prise en compte des autres intrants est importante car les engrais sont souvent utilisés conjointement avec d'autres intrants. Par exemple, les parcelles qui reçoivent plus d'engrais se retrouvent avec une main-d'œuvre plus forte. Si nous ne contrôlons pas pour la quantité de main-d'œuvre, le coefficient d'engrais inclura l'effet de la main d'œuvre et surestimera l'effet de l'engrais sur le rendement des récoltes. X_i est un vecteur de facteurs autres que les intrants qui affectent le rendement des cultures. Les caractéristiques des parcelles sont des déterminants importants du rendement des cultures et sont incluses dans X_i .

Les stratégies d'estimation pour l'équation (1) sont adaptées aux deux ensembles de données que nous utilisons. Malgré le contrôle des caractéristiques des parcelles X_i , l'estimation de β_1 peut ne pas être cohérente. Cela s'explique par le fait qu'il peut y avoir d'autres variables omises expliquant le rendement de la culture et corrélées à la quantité d'engrais appliquée. Par exemple, les ménages les plus riches peuvent obtenir des rendements plus élevés car pouvant acquérir plus de connaissances sur les pratiques agricoles efficaces auprès des agents de stations de radio, de télévision ou de vulgarisation agricole. Ils peuvent également appliquer plus d'engrais parce qu'ils ont de l'argent ou disposent d'un crédit pour l'acheter. Les agriculteurs peuvent également choisir d'appliquer de l'engrais sur des parcelles avec des sols qu'ils considèrent plus réactifs.

Cependant, il convient de tenir compte de plusieurs facteurs, dont plusieurs sont difficiles à quantifier. Par conséquent, pour éliminer les facteurs de confusion au niveau du ménage, dans le modèle LSMS, nous utilisons la méthode des effets fixes sur le ménage pour estimer le modèle (1). Étant donné que l'enquête est transversale contient des données d'une seule année, nous comparons les rendements sur les parcelles d'un même ménage avec différents niveaux d'engrais appliqués. Cela nous permet de contrôler pour les facteurs, d'une part, non observés au niveau des ménages qui expliquent les rendements des cultures et, d'autre part, corrélés à la quantité d'engrais appliquée.

Bien que cette stratégie d'estimation puisse fournir des estimatifs fiables pour β_1 , d'autres préoccupations liées au biais de variables omises peuvent subsister. Les caractéristiques de la parcelle non observées sont susceptibles d'affecter les rendements des cultures. Nous pouvons tenter de mesurer ces variables, comme dans le cas d'échantillons de sol prélevés dans la Savane soudanienne, et de les inclure en tant que variables explicatives. Par exemple, la matière organique du sol détermine en partie la réponse des engrais azotés (Marenya et Barrett 2009). L'omission de telles variables au niveau de la parcelle pourraient donner des estimations incohérentes de β_1 .

Avec les données du LSMS, nous utilisons l'estimation par variables instrumentales, combinée aux effets fixes sur les ménages, pour résoudre ces problèmes et fournir des estimations plus robustes de l'effet de l'engrais sur le rendement des cultures. L'instrument capture la diffusion générale des engrais dans la région où réside le ménage. Nous utilisons, notamment, le taux moyen d'engrais appliqué dans les parcelles de la grappe emblavées en cette culture. Toutes les parcelles cultivées par le ménage sont exclues de la moyenne. L'instrument est calculé en faisant la moyenne du taux d'application d'engrais sur 1 à 30 parcelles (en moyenne, l'instrument est construit en utilisant 3,5 parcelles). Par conséquent, un instrument est créé pour les engrais azotés.

Le taux de diffusion des engrais varie d'une culture à une autre et l'instrument varie donc au sein des ménages qui cultivent plusieurs cultures. Étant donné que la stratégie d'identification combine les effets fixes sur les ménages et l'estimation par variable instrumentale, il est nécessaire que l'instrument varie au sein des ménages. Si nous estimons une fonction de réponse de rendement séparément pour chaque culture, l'instrument ne variera pas au sein des ménages et nous ne serons donc pas en mesure d'utiliser des effets fixes sur les ménages avec l'estimation des variables instrumentales³. Nous présentons donc des régressions distinctes pour le mil, le sorgho et le maïs qui ont été estimées avec les effets fixes sur les ménages uniquement.

Nous nous attendons à ce que l'instrument soit corrélé à la variable potentiellement endogène, car il capture la disponibilité générale d'engrais dans la localité. Nous ne prévoyons pas que l'allocation d'engrais des ménages influe directement sur les rendements des cultures d'autres ménages, sauf dans le cas d'une utilisation plus accrue d'engrais. A partir de ces hypothèses, nous obtenons des estimations cohérentes de β_1 . L'instrument ne sera pas valide s'il affecte les rendements par le biais de mécanismes autres que l'augmentation de la quantité d'engrais appliquée sur la parcelle. Par exemple, la corrélation entre l'instrument et l'utilisation plus intensive d'autres intrants serait problématique si l'instrument devait être corrélé à une utilisation plus intensive de ces autres intrants. Puisque nous incluons la quantité d'autres intrants alloués à la parcelle en tant que variables explicatives, nous résolvons ce problème en contrôlant pour l'effet que l'instrument pourrait avoir par l'utilisation d'autres intrants. Nous ne regroupons pas les erreurs par ménage lorsque nous utilisons des modèles à effets fixes.

Dans l'étude de cas de la Savane soudanienne, qui représente un échantillon relativement limité de ménages, toutes les régressions sont estimées avec des erreurs standard robustes, regroupées par ménage. Dans les régressions estimées avec des nutriments mesurés dans des tests de laboratoire effectués sur des échantillons de sol, nous combinons les deux céréales des zones arides dans une seule régression compte tenu du nombre encore plus faible d'observations. Les variables binaires et d'interaction sont incluses pour contrôler, d'une part, pour les effets des

³ Les ménages possèdent souvent plusieurs parcelles de chaque culture, mais comme l'instrument (taux de diffusion) utilise la même valeur, nous ne pouvons pas combiner les méthodes IV et FE pour une seule culture. Par exemple, si un ménage possède 2 parcelles de maïs, la valeur du taux de diffusion du maïs pour ces deux parcelles est la même. Par conséquent, si nous utilisons la méthode HH FE-IV, l'instrument échouera, car il ne varie pas au sein du ménage. Mais lorsque nous combinons des cultures, la valeur de l'instrument varie au sein d'un ménage car les différentes cultures ont des taux de diffusion différents.

cultures sur le rendement des céréales et, d'autre part, pour la réponse du rendement aux nutriments azotés par hectare. Nous testons également un terme quadratique pour les nutriments azotés par ha, qui indique si la réponse du rendement à l'azote est observable dans les données. Dans l'ensemble des régressions estimées avec les sols classés selon les perceptions des agriculteurs, ainsi que la régression combinée, nous avons également estimé des régressions distinctes pour le maïs et le sorgho, car les échantillons sont plus grands.

Pour contrôler sa robustesse, nous testons également le modèle combiné final avec les sols classés selon les perceptions des agriculteurs (le plus grand échantillon) en utilisant l'approche de la fonction de contrôle. Cette approche est appliquée à la place des méthodes des variables instrumentales en raison de l'endogénéité potentielle de plusieurs variables (engrais azoté appliqué, interaction et termes carrés). Nous utilisons comme instruments à la fois la question de savoir si le gérant de parcelle a bénéficié ou non de subvention aux engrais et la proportion de gérants de parcelle du village qui sont membres de coopératives enregistrées. Dans une étude récente, Theriault, Smale et Assima (à paraître) ont constaté que les agriculteurs maliens membres des coopératives avaient un meilleur accès aux engrais que ceux non-membres. La participation au programme de subvention et à une coopérative est susceptible d'affecter l'utilisation d'engrais (restriction d'inclusion), mais il est peu probable qu'elle soit corrélée à des conditions non observables (restriction d'exclusion).

2.3 Variables

Les variables explicatives des deux analyses diffèrent quelque peu pour refléter les différences sous-jacentes dans les données. Les variables utilisées dans l'analyse LSMS sont répertoriées dans le tableau 1. La superficie de la parcelle, mesurée en hectares, nous permet d'examiner si la productivité diffère selon la taille de parcelle. Dans les données LSMS, notre vecteur I comprend un vaste ensemble d'intrants agricoles: fumier, composte, autres engrais biologiques (résidus de récolte), pesticides, herbicides, fongicides, autres liquides de protection végétale, semences améliorées et locales. La distance de la parcelle au domicile est liée au temps nécessaire pour se rendre au champ pour gérer les cultures et constitue également une mesure potentielle de la fertilité puisque les parcelles situées plus loin pourraient avoir été défrichées et mis en culture plus récemment. En outre, les ménages peuvent choisir d'investir davantage dans des parcelles les plus proches car elles sont plus sûres (Gebremedhin et Swinton 2003) et sont plus faciles à atteindre, ce qui réduit ainsi le temps et les coûts de déplacement. Une variable muette est également incluse pour contrôler s'il existe une structure anti-érosion sur la parcelle, comme les cordons pierreux ou les diguettes, qui ont été promues dans certaines régions du pays pour compenser la perte importante de nutriments du sol pendant la saison des pluies et permettre aux agriculteurs de retenir l'humidité (Tappan et McGahuey 2007).

La position dans la topo-séquence (bas-fonds, plaine, pente, plateau) et la texture du sol ainsi que les indicateurs importants de la qualité du sol de cette région sont fortement corrélés au type de culture exploitée (Udry 1996; Guirking et coll. 2015). Bazile et al. (2008) explique que les

agriculteurs définissent le type de sol en fonction de la position du champ dans la séquence topologique. Les agriculteurs distinguent les sols peu profonds des plateaux ou des zones d'élévation de ceux moyennement profonds et ceux alluviaux peu profonds des bas-fonds. L'observation des différences entre les sols au sein des exploitations et entre elles, nous éclaire sur les raisons qui motivent la culture de plusieurs variétés et plantes et dans un environnement donné. Pour capturer la position de la parcelle dans la séquence topologique, nous incluons des indicateurs binaires de l'emplacement dans la plaine, dans les bas-fonds, sur une pente ou sur un plateau. Des variables muettes pour le type de sol sont également incluses, représentant les sols classés selon les perceptions des agriculteurs (sableux, limoneux, argileux).

Les variables explicatives utilisées dans l'analyse des données de la Savane soudanienne sont répertoriées dans le tableau 2. Nous estimons le rendement du maïs-sorgho (grain récolté par ha) en réponse à l'azote, mais sans inclure les parcelles de mil, pour lesquelles nous ne disposons pas de données sur la production. L'application d'engrais est calculée de la même manière que dans l'analyse LSMS, et toutes les régressions comprennent des intrants conventionnels, un ensemble commun de caractéristiques de parcelle et un indicateur de précipitations au niveau des villages. L'application de fumier est mesurée comme une variable binaire en raison de difficultés à mesurer les quantités de manière fiable. Les jours de travail, les quantités en litres d'herbicide et les heures d'utilisation de l'équipement sont calculées par ha. Les caractéristiques communes des parcelles sont la distance (temps de trajet en minutes à pied) entre le domicile et la parcelle, la présence d'une structure anti-érosion du sol sur la parcelle, l'association de la culture primaire avec une culture intercalaire légumineuse (arachide, niébé). Les précipitations moyennes pendant la période de fertilisation de l'année de l'enquête sont enregistrées à l'échelle géographique du village.

Deux ensembles de caractéristiques des sols de parcelles sont testées avec les données de la Savane soudanienne. Dans le premier cas, ces caractéristiques dépendent de la teneur en éléments nutritifs du sol testée en laboratoire. Ceux-ci incluent le pourcentage de matière organique du sol (C), le sable, le limon et l'argile, le pourcentage d'azote total (N), le phosphore assimilable (P), le potassium échangeable (K) et le pH du sol (KCI). Étant donné que la teneur totale en carbone (C) change au fil des siècles et que le carbone actif change sur une période de 3 à 5 ans (Weil et al. 2016), ceux-ci ne sont pas affectés par les récentes applications d'engrais. De même, la teneur totale en azote (N), qui inclut l'azote contenu dans la matière organique du sol, n'est pas affectée par l'utilisation récente d'engrais (Sieglinde Snapp, communication personnelle, 17 Octobre 2017). Les agriculteurs ne peuvent pas non plus déduire la teneur spécifique en nutriments de leurs sols (P, K). Dans le second cas, nous substituons les caractéristiques des sols classés selon les perceptions des agriculteurs. Les variables binaires sont saisies pour la position de la parcelle dans la topographie et pour les sols classés selon les perceptions des agriculteurs, comme dans les données du LSMS, bien que les catégories diffèrent légèrement.

3 Résultats

3.1 Statistiques descriptives

Le mil, le sorgho et le maïs sont cultivés respectivement sur 39, 32 et 29% des parcelles de l'échantillon du LSMS. La répartition des parcelles par région et par culture est indiquée dans le tableau 3. Seules quelques observations apparaissent pour Tombouctou et Gao, et quelques-unes pour les zones périurbaines situées aux alentours de Bamako. Les parcelles de mil sont concentrées dans les principales zones de production primaire de mil de Ségou et Mopti, tandis que le sorgho est représenté dans les régions primaires et secondaires de production de sorgho de Koulikoro, Ségou, Kayes et Sikasso. Le maïs est le plus largement représenté à Sikasso.

Les taux d'application d'engrais diffèrent considérablement d'une culture à une autre. Le tableau 4 montre les taux d'utilisation moyens calculés à partir des ensembles de données du LSMS et de la Savane soudanienne par culture céréalière et par région, comparés aux taux recommandés et aux taux économiquement optimaux estimés avec des fonctions de réponse basées sur des données expérimentales (Dicko et al. 2016). Elles diffèrent également de façon importante par région, comme on pourrait s'y attendre compte tenu des sites régionaux par rapport au bioclimat.

Les taux agronomiques de N recommandés par hectare sont de 32 pour le sorgho et le mil et de 84 pour le maïs, sur l'ensemble du territoire national (Dicko et al. 2016). Ceux-ci correspondent à 100 kg/ha sur les trois cultures pour le complexe céréalier, 100 kg/ha de NPK (16-16-16) pour le mil et le sorgho, 250 kg/ha de NPK (23-10-5) pour le maïs, 100 -150 de DAP pour les céréales et 50-400 kg/ha pour les autres cultures et engrais (voir aussi Thériault et al. 2016). La moyenne globale de N en kg par hectare pour le mil, le sorgho et le maïs dans les données du LSMS est de 6,7, mais les taux d'utilisation du maïs sont considérablement plus élevés sauf dans la région de Kayes. Pour toutes les trois céréales et les cinq régions à l'exception du mil à Sikasso, les taux d'utilisation moyens estimés ne représentent qu'une fraction des taux économiquement optimaux. À Koulikoro, Ségou et Mopti, les taux d'utilisation moyens de N sur le sorgho et le mil ne dépassent pas 9%, alors que les optima économiques vont de 21 à 26. Une fois encore, le taux moyen d'azote appliqué par hectare sur le maïs à Sikasso (36,2) est le plus proche mais reste loin derrière l'optimum économique (56-65). Les taux d'application moyens de phosphore pour l'ensemble de l'échantillon de LSMS ne sont que de 1 kg/ha et 1,9 kg/ha pour le mil et le sorgho respectivement, mais de 6,7 kg/ha pour le maïs, ce qui est proche des niveaux recommandés. Les taux d'utilisation recommandés pour P sont de 10% pour le sorgho et le mil et les taux économiquement optimaux sont plus élevés selon les estimations. (Dicko et al. 2016).

Dans l'ensemble, en appliquant leur outil d'optimisation des engrais, Dicko et al. (2016) ont trouvé que les taux économiquement optimaux de N (d'azote) étaient bien en dessous des recommandations pour le maïs, le sorgho et le mil, variant selon le bioclimat (Sahel, Savane soudanienne, pré-guinéen). Le contraire était généralement vrai pour le P sur le sorgho et le mil,

mais pas pour le maïs. La réponse à P était particulièrement forte dans les zones plus arides. Des recherches antérieures de Doumbia et al. (1993) et récentes de Rattunde et al. (à paraître) font état des effets de P faiblement assimilable sur le sorgho en particulier.

Les taux d'application moyens de N par hectare sur le maïs et le sorgho figurent également dans le tableau 4 pour la Savane soudanienne. Dans cette zone à potentiel relativement élevé, les taux d'utilisation moyenne sur le sorgho (6,41%) sont plus proches des taux de Sikasso du LSMS (9,38%) que de ceux de Koulikoro à (< 1%), et même à peu près les mêmes pour le maïs (39,8) qu'à Sikasso (36,2). Une fois de plus, les deux ne représentent qu'une fraction du taux économiquement optimal estimé par Dicko et al. (2016), qui, à son tour, ne représente qu'une fraction du taux recommandé au niveau national.

3.2 Fonctions de réponse de rendement

Les tableaux 5 à 8 présentent des modèles de réponse de rendement estimés avec les données du LSMS. Les variables de rendement et d'intrants, y compris la quantité d'engrais, sont incluses dans les logarithmes⁴ afin de lisser leurs distributions, qui sont concentrées dans les valeurs les plus faibles et ont une forme asymétrique. Par conséquent, β_1 et β_2 seront interprétés en termes de pourcentage de variation de rendement. Par exemple, une augmentation de 1% de la quantité d'engrais appliquée à une parcelle entraîne une augmentation de β_1 % du rendement des cultures de céréales sèches. Les coefficients ont été convertis en produits marginaux en calculant la variation marginale du rendement (en kg/ha) à partir d'une augmentation d'1% de la quantité d'engrais (N kg/ha) à la moyenne et sont indiqués dans les lignes inférieures des tableaux. Les modèles ont également été estimés en niveaux (sans utiliser le logarithme de rendement ou des intrants) et fournissent des estimations similaires, mais les coefficients sont estimés de manière moins précise. Les estimations à partir de la spécification en niveaux sont présentées en annexe.

Nous quantifions d'abord l'effet des nutriments azotés sur les rendements des cultures en utilisant une estimation des effets fixes des ménages (tableau 5). Toutes les régressions sont estimées au niveau de la parcelle. La variable dépendante est le rendement des cultures (kg/ha), et les variables muettes sont incluses dans le contrôle des céréales sèches. D'autres variables de contrôle décrites ci-dessus sont incluses séquentiellement pour vérifier si le coefficient de l'engrais change de manière substantielle.

Les coefficients appliqués aux engrais azotés dans les modèles suggèrent qu'une augmentation de 1% de la quantité d'engrais azoté appliquée à la parcelle entraîne une augmentation de 0,04-0,07% des rendements des cultures des céréales sèches. Tandis que le coefficient est statistiquement supérieur à zéro à au moins au niveau de significativité statistique de 10% dans toutes les spécifications, les résultats indiquent une réponse du rendement relativement faible à

⁴Puisque les variables peuvent prendre des valeurs nulles, on leur rajoute une valeur avant d'utiliser le logarithme naturel

l'azote. Ces élasticités correspondent à des produits physiques marginaux variant de 5,2 à 8,8⁵, en moyenne, pour les céréales sèches (maïs, mil et sorgho).

Nous constatons que les rendements diminuent en fonction de la taille de la parcelle – ce qui est cohérent avec la relation de productivité inverse (Benjamin 1995) qui a également été observée dans cette région (Udry 1996; Kazianga et Wahhaj 2013; Guirkinger et coll. 2015). Les parcelles sur lesquelles du fumier a été appliqué et celles dotées de structures anti-érosion génèrent de meilleurs rendements. Les rendements augmentent en fonction de quantité de semences locales et ils augmentent encore plus en fonction de quantité de semences améliorées. Davantage de main-d'œuvre affectée à une parcelle augmente également les rendements. Cet effet est significatif partout et avec une élasticité relativement élevée (0,3-0,4), suggérant que la main-d'œuvre limite la productivité. Il existe des preuves démontrant que l'utilisation d'herbicides améliore les rendements en protégeant les cultures, mais pas dans les modèles plus complets (5). L'utilisation de pesticides (plus susceptibles sur le maïs que sur les autres cultures) affecte positivement les rendements, mais nous ne trouvons aucun effet des fongicides, ou d'autres liquides protecteurs, qui sont utilisés en quantités très limitées. La présence de structures anti-érosion a un effet significatif sur les rendements.

Ensuite, nous nous tournons vers les estimations FE-IV pour une inférence plus robuste de l'effet de l'engrais sur les rendements (tableau 6). Dans toutes les spécifications, la statistique F de la première étape est bien supérieure à 10, ce qui est souvent utilisé comme règle générale pour la restriction d'inclusion. La statistique F est également supérieure à la valeur critique de 16,38 de la taille maximum de IV de Yogo-Stock pour le seuil de 10 %, ce qui suggère que la restriction d'inclusion est satisfaite. Les estimations FE-IV pour les engrais sont bien plus significatives que celles présentées dans le tableau 5, ce qui suggère que l'endogénéité peut réduire les estimations de la réponse du rendement à l'engrais. Dans toutes les spécifications, l'effet de l'engrais azoté appliqué est statistiquement significatif. Une augmentation de 1% de la quantité d'engrais appliquée à la parcelle entraîne une augmentation de 0,1-0,2% des rendements des cultures des céréales sèches. Cela se traduit par une augmentation de 17 à 27 kg/ha du rendement des cultures des céréales sèches pour une unité additionnelle d'engrais azoté en kg/ha. Le fait de contrôler pour la toposéquence et le type de sol, notamment, réduit le produit marginal attribuable aux engrais.

Les deux modèles présentés dans les tableaux 5 et 6 ont également été estimés avec des spécifications contenant des termes quadratiques pour les engrais et des termes d'interaction entre les variables muettes d'engrais et de cultures. Les estimations ponctuelles de ces termes quadratiques et d'interaction étaient proches de zéro et statistiquement peu significatives; par conséquent, nous avons sélectionné des spécifications plus parcimonieuses.

Des régressions distinctes des effets fixes des ménages ont également été estimées pour chaque culture de céréales (tableaux 7 à 9). Étant donné que l'instrument ne varie pas d'une parcelle à une autre au sein d'un ménage, il n'existe pas d'estimateurs de FE-IV pour les modèles lorsqu'ils

⁵Ces chiffres sont calculés en multipliant les coefficients estimés par le rendement moyen et les quantités d'engrais de l'échantillon de régression.

sont estimés séparément par culture. Les résultats suggèrent que les rendements de mil et de sorgho ne sont pas affectés par l'utilisation d'engrais. Pour le maïs, dans l'un des modèles les plus simples, une augmentation de 1% de la quantité d'engrais appliquée à la parcelle se traduit par une augmentation des rendements d'environ 0,15%, ce qui correspond à un produit marginal de 11. La taille de l'échantillon de ces modèles est inférieure à celle des modèles regroupés des effets fixes des ménages présentés dans le tableau 6, conduisant à des estimations moins précises. De plus, ces coefficients peuvent être biaisés à la baisse, étant donné que les estimations tirées des modèles regroupés des effets fixes des ménages sont plus petites que les estimations du FE-IV. Cependant, nous pouvons considérer ces estimations comme la limite inférieure de l'effet réel de l'engrais sur le rendement des cultures.

Dans l'ensemble, l'analyse des données de LSMS montre que les engrais azotés ont des effets positifs et statistiquement significatifs sur les rendements de céréales sèches. Bien que les estimations générées avec l'OLS soient proches de zéro, lorsque nous tenons compte de l'endogénéité de l'utilisation d'engrais, les ordres de grandeur prévus varient entre 17 et 23% pour les trois cultures combinées. Pour le maïs en particulier, celles-ci figurent dans la marge attendue. Ahmed, Gautam et Gaskell (2017), qui ont utilisé une approche de fonction stochastique utilisant le même ensemble de données, n'ont trouvé aucun effet statistiquement significatif des engrais minéraux sur le rendement des cultures. Foltz, Aldana et Laris (2012) ont estimé des élasticités significatives du rendement du maïs de 0,2 à 0,3 pour les engrais, supérieures à celles que nous avons trouvées ici, bien qu'ils aient utilisé la quantité totale d'engrais en kg ainsi que des données provenant uniquement de la région très productive de Sikasso.

D'après la répartition de l'échantillon présentée dans le tableau 3, une des raisons pouvant expliquer les faibles résultats pourrait être que la représentation nationale dans l'échantillon couvre d'énormes différences entre les systèmes d'exploitation et les agro-écologies, de sorte que la représentation d'un système agricole donné est inadéquate.

C'est l'une des raisons pour lesquelles nous avons inclus les estimations de l'étude de cas sur la Savane soudanienne. Celle-ci possède le plus grand potentiel agricole du Mali pour la production de sorgho et de maïs (Dicko et al. 2016). Malgré cela, de manière anecdotique, les agriculteurs interrogés ont signalé que les rendements de sorgho étaient inférieurs aux attentes en raison de la baisse de la fertilité des sols, mais également des dégâts causés par l'humidité et les organismes nuisibles, les incitant à passer du sorgho au maïs (Alpha Kergna, communication personnelle). Même ici, les données indiquent un taux de réponse de rendement à l'engrais très modeste pour l'une ou l'autre des cultures. Pour ce qui est du sorgho, l'une des raisons pourrait être le taux d'application extrêmement faible, les taux d'application par hectare sur les parcelles de maïs de notre enquête ont été en moyenne de 158 kg d'engrais, soit 39,8 kg de nutriments N/ha, contre seulement 27 kg d'engrais pour le sorgho (6,4 kg de nutriments N/ha). Pour le sorgho, toutefois, cette moyenne est plus élevée que dans les données du LSMS. Notre échantillon de sorgho comprend beaucoup de zéros (66%), contre seulement 14% dans les parcelles de maïs. Les tableaux 10 et 11 fournissent des informations supplémentaires.

Le tableau 10 indique trois spécifications de la fonction de réponse, chacune comprenant les caractéristiques des sols mesurées par des tests en laboratoire sur des échantillons. Le modèle 1 est une régression linéaire simple, en prenant en compte la parcelle de sorgho seulement comme une variable binaire affectant les rendements totaux. L'effet sur le rendement est fort et négatif et réduit les rendements moyens de grains d'environ 600 kg/ha par rapport au maïs, en contrôlant pour d'autres facteurs. Le modèle 2 comprend un effet d'interaction entre la quantité en kg/ha de nutriment N et la parcelle de sorgho. L'effet est négatif mais pas statistiquement significatif. Dans le modèle 3, le terme quadratique pour N appliqué est rajouté et il présente un signe négatif mais n'est pas statistiquement significatif. L'effet d'interaction devient significatif, indiquant que la culture du sorgho a réduit la réponse au rendement de 9 kg de nutriments N/ha par rapport au maïs. En moyenne, le modèle 3 suggère qu'un kilogramme supplémentaire de nutriments N par ha contribue à 10,4 kg supplémentaires de grains de maïs par ha. Combiné à l'effet d'interaction, cela suggère un taux de réponse d'environ 1,3 seulement pour le sorgho.

Les autres coefficients d'intérêt, qui sont cohérents à travers les trois spécifications, sont un effet positif et significatif de la main-d'œuvre et l'utilisation des équipements, et un effet négatif et significatif de la distance à la parcelle et de l'association de légumineuses sur les rendements. L'ordre de grandeur et la significativité statistique des effets des intrants suggèrent que ceux-ci peuvent limiter la productivité, ce qui est corroboré par l'effet négatif sur la durée du trajet à pied entre le domicile et la parcelle. La relation inverse entre le rendement et l'association de légumineuses s'explique par le fait que nous n'avons pas été en mesure de contrôler pour les superficies emblavées en cultures principales et secondaires, entraînant ainsi un biais à la baisse du rendement de la culture principale. D'un autre côté, tout effet positif à long terme de l'association de cultures serait difficile à discerner dans les données d'enquête d'une seule année de ce type. De même, les structures d'érosion ont souvent été construites au cours des années précédentes et peuvent être en mauvais état. La plupart sont des cordons pierreux pour contrôler l'érosion sur les pentes mais la majorité des parcelles de l'échantillon se trouvent sur une plaine. Le fait que la variable du fumier ne soit pas statistiquement significative peut refléter le fait que si la plupart des agriculteurs appliquent du fumier (64%), la quantité et la qualité appliquées varient considérablement.

Parmi les éléments nutritifs du sol évalués, l'effet de P est fortement significatif (à 1%), ce qui suggère qu'il constitue une contrainte pour la productivité. Au Mali, dans de nombreuses régions productrices de sorgho, nous avons des raisons de croire que le phosphore est une contrainte plus importante que N (Kihara et al. 2016; Dicko et al. 2016; Weltzien, communication personnelle. Le 29 Novembre 2017). La teneur en argile est positivement associée à la productivité.

Le tableau 11 présente les résultats de la spécification du modèle 3 (variable binaire de culture, interaction entre la culture et la quantité en kg/ha de nutriments N, le terme quadratique de nutriments N en kg/ha) pour le maïs et le sorgho combinés, suivis des régressions estimées séparément par culture. Les résultats combinés du modèle 3 sont similaires à ceux présentés dans le tableau 7, aussi bien en termes d'ordre de grandeur et de signification statistique de la réponse qu'en termes d'autres intrants principaux (main-d'œuvre, équipement) influant la productivité.

Dans les régressions estimées séparément par culture, nous trouvons un taux de réponse de rendement significatif pour le maïs de 14,4 et un taux de réponse non significatif de 3,6 pour le sorgho.

Certaines différences apparaissent dans les facteurs clés des régressions présentées dans le tableau 10. La structure d'érosion des sols semble être significative dans les régressions combinées et pour le sorgho seulement, avec le signe positif attendu. Aucune des parcelles de maïs n'a fait l'objet d'association de cultures. Le type de sol sableux est faiblement significatif (10%) par rapport aux sols graveleux dans la régression combinée. Aucune des trois catégories de toposéquence n'est statistiquement significative dans aucune des régressions. Le type de sol argileux semble être plus significatif dans la régression combinée et notamment dans celle du sorgho, tandis que l'utilisation du fumier est significative dans la régression du maïs. Les précipitations pendant la période de fertilisation ont un effet positif sur la productivité dans la régression du maïs mais un effet négatif sur celle du sorgho. Cela peut représenter des différences au niveau des besoins en humidité des deux cultures par rapport à la saison agricole et à l'humidité du sol. Globalement, la régression du maïs est celle qui est la plus faible statistiquement avec beaucoup moins d'observations que celle du sorgho.

Le tableau 12 montre les coefficients provenant de la fonction de réponse du rendement de la seconde étape estimée avec l'approche de la fonction de contrôle. La régression des rendements est basée sur le modèle combiné maïs-sorgho avec des sols classés selon les perceptions des agriculteurs, afin de tirer parti du plus grand nombre possible d'observations. Dans la première étape de la régression, qui teste et contrôle l'endogénéité potentielle de l'utilisation d'engrais dans la réponse du rendement, le coefficient de la variable binaire indiquant que le gérant de parcelle a bénéficié de la subvention d'engrais et le coefficient de la proportion des gérants de parcelle appartenant à une coopérative enregistrée au sein du village, sont tous les deux statistiquement significatifs à 1%. Il en est de même pour le résiduel inclus dans la régression de rendement, ne permettant pas de soutenir l'exogénéité de l'utilisation d'engrais dans la fonction de réponse du rendement. Comme c'était le cas dans les estimations du LSMS, les produits marginaux d'engrais azotés (24 pour le maïs et 18 pour le sorgho) augmentent lorsque l'endogénéité est prise en compte.

Les taux de réponse estimés pour le maïs indiqués dans les tableaux 11 et 12 se situent dans la fourchette d'autres estimations pour la même culture, à partir des données collectées dans les champs des agriculteurs en Afrique subsaharienne. Un examen mené par Yanggen et coll. (1998) montre que les taux de réponse estimés du maïs à l'azote sont généralement plus faibles en Afrique de l'Ouest qu'en Afrique de l'Est et australe, la plupart se situant dans la fourchette 10-15. A partir des ensembles de données transversaux et de panels représentatifs du niveau national, Koussoubé et Nauges (2017) et Thériault, Smale et Haider (2017) ont respectivement estimé un taux de réponse de rendement d'environ 19 kg/ha à l'azote sur le maïs au Burkina Faso. En revanche, Marenya et Barrett (2009) ont estimé un produit marginal de 40 à 44 kg/ha dans l'ouest du Kenya, tandis que Sheahan et al. (2013) ont signalé des produits marginaux allant de 14 à 25 kg/ha dans les zones agro-écologiques du Kenya. Les taux de réponse rapportés par Xu et al. (2009) pour la Zambie varient de moins de 10 à 30 kg/ha, avec une médiane de 16.

Les estimations de la réponse du sorgho aux engrais, bien que faibles et non statistiquement significatives, se situent également dans la fourchette citée dans la littérature. L'analyse des données d'essais menées par l'Institut de Recherches Agronomiques Tropicales (IRAT) de 1978 à 1982 au Burkina Faso a révélé des réponses expérimentales de 10,3 kg de grains de sorgho par kg de N, avec des chiffres bien inférieurs pour les champs des agriculteurs (Matlon, 1983). Dans une première recherche documentaire sur ce sujet, Yanggen et al. (1998) ont constaté que le produit marginal physique des nutriments azotés dans la production de sorgho en Afrique subsaharienne était similaire à d'autres régions de production de sorgho du monde comme l'Inde, mais qu'ils étaient plus faibles en Afrique de l'Ouest, où les taux les plus souvent rapportés variaient de 4 à 5. Dans une analyse récente menée au Nigéria, Omonona et al. (2016) ont trouvé des taux de réponse de sorgho d'environ 1 kg seulement dans les systèmes de culture de racines et céréales et dans les systèmes agropastoraux.

4 Conclusions

Au Mali, l'augmentation de la production de céréales sèches (maïs, mil, sorgho) afin d'améliorer la sécurité alimentaire doit être obtenue par des rendements plus élevés plutôt que par une extension supplémentaire de la superficie cultivée. Bien que les rendements de maïs dans les exploitations aient augmenté ces dernières années, ils sont bien en deçà de leur potentiel. En règle générale, les rendements de mil et de sorgho dans les exploitations sont restés faibles. L'utilisation inadéquate d'engrais inorganique a été identifiée comme une cause de la faible productivité agricole de ces cultures. Pour encourager l'utilisation des engrais et stimuler la productivité, le gouvernement malien a mis en place un programme de subventions aux engrais depuis la flambée mondiale des prix des produits alimentaires de 2008. Ayant commencé par le riz, le programme cible désormais également les céréales sèches. Cependant, peu de données sont disponibles sur la réponse de ces cultures aux engrais dans les conditions auxquels les agriculteurs sont confrontés. Cette étude vise à combler cette lacune en examinant les réponses du rendement des céréales sèches aux engrais à l'aide de deux ensembles de données sur les ménages agricoles. Le premier, le LSMS-ISA, est représentatif du territoire national. Le second, collecté dans la région de la Savane soudanienne, est représentatif d'une zone à potentiel relativement élevé pour la production de sorgho et de maïs.

Une combinaison de techniques économétriques est utilisée pour contrôler pour les problèmes d'endogénéité potentiels et vérifier la robustesse des résultats. Quatre conclusions clés émergent. Premièrement, il est important de contrôler pour l'endogénéité afin d'éviter de sous-estimer l'effet de l'utilisation d'engrais sur les rendements. Deuxièmement, la texture et les méthodes de gestion du sol (structures de lutte contre l'érosion) affectent à la fois les rendements et les effets estimés des engrais. Troisièmement, les réponses des rendements de sorgho aux engrais sont plus faibles que celles des rendements de maïs. Quatrièmement, les réponses aux engrais des rendements des céréales sèches sont plus fortes dans la région de la Savane soudanienne (échantillon) que dans l'ensemble du pays (ensemble de données représentatives du territoire national), soulignant ainsi l'importance des facteurs agro-écologiques et des systèmes agricoles.

Ensemble, ces résultats suggèrent que l'utilisation d'engrais minéraux a le potentiel de stimuler la productivité, notamment pour le maïs, mais en complémentarité avec d'autres pratiques qui réduisent l'érosion des sols et améliorent la qualité du sol.

Un aspect clé que cette étude n'a pas abordé est la rentabilité de l'utilisation d'engrais. Des travaux connexes de Dicko et al. (2016), qui soutiennent la nécessité de diverses recommandations, suggèrent également que les optima économiques sont généralement inférieurs aux optima agronomiques recommandés par les programmes nationaux. Étant donné que les rendements de maïs répondent aux engrais, l'inadéquation des taux d'application peut-elle s'expliquer par de faibles incitations économiques? Le programme de subventions contribue-t-il à renforcer les incitations économiques? Si oui, à quels coûts sociaux? Compte tenu des faibles taux de réponse des rendements de mil et de sorgho aux engrais, est-il judicieux de leur fournir des engrais subventionnés? Est-il rentable d'appliquer sur le sorgho et le mil des engrais, même à des prix subventionnés? Des recherches supplémentaires sont nécessaires pour aborder ces questions importantes et formuler des recommandations politiques pertinentes sur le programme de subventions proprement dit et d'autres mécanismes visant à promouvoir l'intensification de l'agriculture.

Figure 1a. Zones agro-écologiques et capitales régionales du Mali. La Savane soudanienne fait référence à la zone couvrant l'isohyète de 700-1000 mm (précipitations attendues par an)

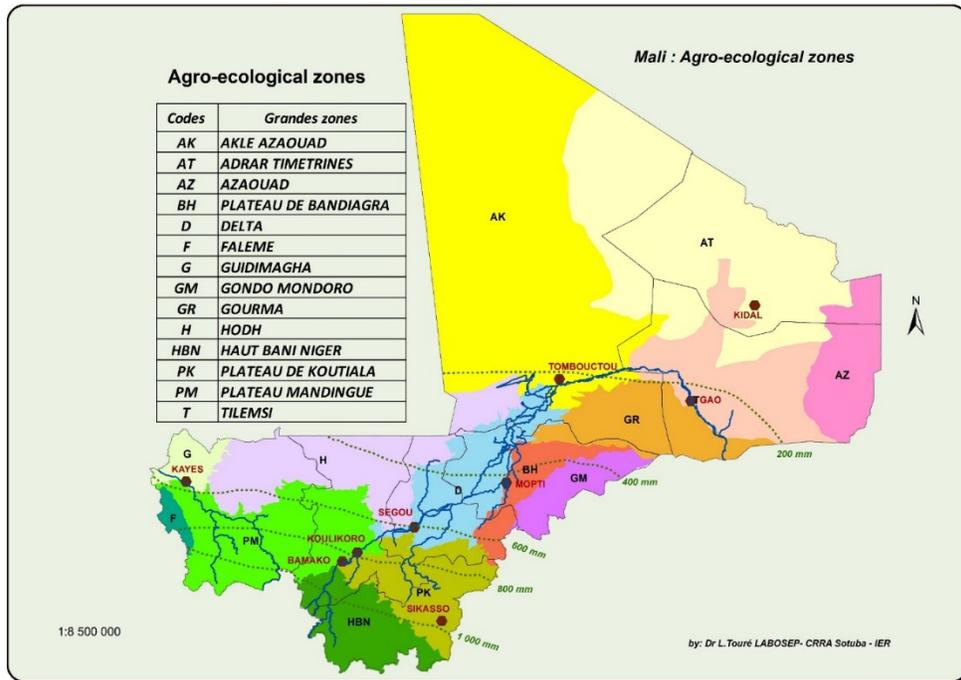


Figure 1b. Villages d'enquête de la Savane soudanienne, zones agro-écologiques et isohyète 800 mm

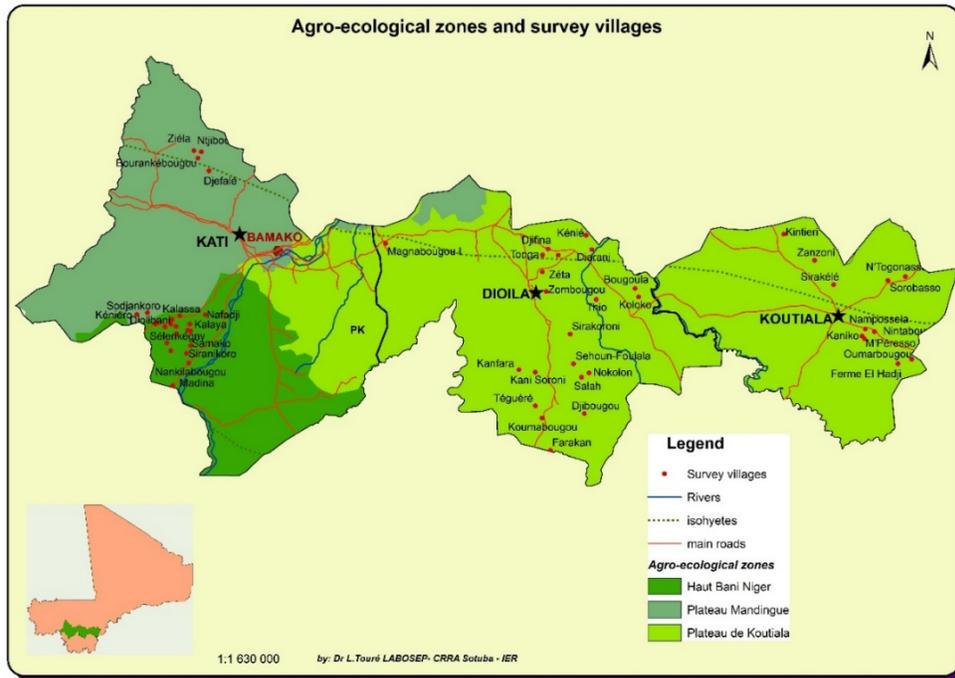


Tableau 1 : Statistiques descriptives, données de LSMS-ISA

Variable	Moyenne	Ecart-type	Minimum	Maximum
Rendement de mil (kg/ha)	695,82	629,85	0,66	3759,40
Rendement de Sorgho (kg/ha)	735,70	686,50	0,53	3930,13
Rendement de Maïs (kg/ha)	1492,66	1221,45	1,26	6000
<i>Intrants</i>				
Engrais azoté (nutriments N kg / ha)	6,74	23,60	0,00	288,66
Fumier (kg / ha)	1594,88	3800,28	0,00	29850,75
Composte (kg / ha)	25,84	247,22	0,00	4889,98
Autre engrais biologique (kg / ha)	5,64	60,61	0,00	1708,43
Pesticides (litre/ha)	0,053	0,51	0,00	10,47
Fongicides (litre/ha)	0,033	0,42	0,00	19,66
Herbicide (litre/ha)	0,27	1,17	0,00	19,05
Autres liquides protecteurs (litre / ha)	0,0066	0,11	0,00	3,14
Semence locale (kg / ha)	10,37	15,42	0,00	236,84
Améliorée locale (kg / ha)	1,00	4,45	0,00	50,72
<i>Main d'œuvre</i>				
Main d'œuvre totale (nombre de jours / ha)	45,13	84,84	0,00	1031,25
<i>Caractéristiques de la parcelle</i>				
Superficie de la parcelle (ha)	3,07	6,12	0,02	52,73
Distance entre la parcelle et le domicile (km)	2,81	4,00	0,00	60,00
Plaine (0/1)	0,70	0,46	0,00	1,00
Plateau (0/1)	0,14	0,35	0,00	1,00
Bas-fonds (0/1)	0,034	0,18	0,00	1,00
Zone en pente (0/1)	0,13	0,34	0,00	1,00
Sol sablonneux (0/1)	0,53	0,50	0,00	1,00
Sol argileux (0/1)	0,36	0,48	0,00	1,00
Sol en latérite (0/1)	0,11	0,31	0,00	1,00
Structure anti-érosion (0/1)	0,043	0,20	0,00	1,00

Source: Auteurs, basés sur LSMS-ISA, Mali. Nombre d'observations de parcelle = 3733

Tableau 2: Statistiques descriptives, données de la Savane soudanienne

Variable	Moyenne	Ecart- type	Minimum	Maximum
Rendement de Maïs (kg/ha)	1497	945	12,5	4730
Rendement de Sorgho (kg/ha)	642	681	0	4286
Engrais azoté (nutriments kg / ha)	19,5	25,7	0	100
Parcelle de sorgho (0/1)	0,609	0,488	0	1
Fumier (0/1)	0,641	0,479	0	1
Main d'œuvre (jours/ha)	67,98	66,56	0	800
Herbicide (litre/ha)	1,68	2,24	0	25,0
Équipement (heures/ha)	475	474	0	5294
Distance depuis le domicile (minutes)	17,43	17,48	1	160
Structure anti-érosion des sols	0,188	0,391	0	1,00
Légumineuse associée 0/1)	0,112	0,316	0	1,00
N (% d'azote total)	0,028	0,023	0,010	0,200
C (% de matière organique)	0,522	0,334	0,020	2,63
P (phosphore assimilable)	1,29	1,31	0,210	15,9
K (K échangeable)	0,246	0,210	0,020	1,87
Ph (KCI)	5,34	0,40	3,15	7,25
Sable (% > 0,05)	59,6	12,8	7	90,0
Limon (% 0,05-0,002 mm)	36,2	12,3	8	90,0
Argile (% <0,002 mm)	4,26	2,88	0	23,0
Précipitations (mm, période de fertilisation)	220	31	164	299
Plaine	0,865	0,341	0	1
Bas-fonds	0,015	0,122	0	1
Pente	0,119	0,324	0	1
Sablonneux (0/1)	0,381	0,486	0	1
Limoneux (0/10)	0,203	0,403	0	1
Argileux (0/1)	0,269	0,444	0	1
Graveleux (0/1)	0,147	0,354	0	1

Source: Les auteurs se sont appuyés sur les données de l'étude de cas de la Savane soudanienne n = 1222 pour tous sauf le fumier (1096).

Tableau 3: Répartition de l'échantillon analytique du LSMS par région et par culture

Région	Mil		Sorgho		Maïs	
	N	%	n	%	n	%
Kayes	62	3,40	375	25,76	294	21,91
Koulikoro	359	19,68	378	25,96	276	20,57
Sikasso	190	10,42	281	19,30	616	45,90
Ségou	623	34,16	346	23,76	142	10,58
Mopti	516	28,29	68	4,67	0	0,00
Tous	1750	100	1448	100	1328	100

Source: Les auteurs se sont appuyés sur les données du LSMS.

Tableau 4: Taux d'utilisation moyen de N par rapport aux optima recommandés et économiques, par région et par culture

	Taux d'utilisation moyens (N kg / ha)	Taux économiquement optimal	Taux recommandé
LSMS-ISA			
		<i>Mil</i>	
Kayes	0,000	pas de données	32
Koulikoro	0,316	pas de données	32
Sikasso	8,19	8	32
Ségou	3,65	21	32
Mopti	1,50	21	32
		<i>Sorgho</i>	
Kayes	0,182	26	32
Koulikoro	0,722	26	32
Sikasso	9,38	26-28	32
Ségou	7,15	20-26	32
		<i>Maïs</i>	
Mopti	0,360	20	32
Kayes	0,453	54	84
Koulikoro	17,3	54	84
Sikasso	36,2	54-65	84
Ségou	11,7	31-54	84
Savane soudanienne			
		<i>Sorgho</i>	
Koulikoro, Sikasso	6,41	26	32
		<i>Maïs</i>	
Koulikoro, Sikasso	39,8	54	84

Source: Les auteurs se sont appuyés sur des données de l'enquête LSMS et de la Savane soudanienne; des taux recommandés et économiquement optimaux de Dicko et al. (2016). Remarques: Tombouctou, Gao et Mopti (pour le maïs) exclus en raison du faible nombre d'observations.

Tableau 5 : Rendement des céréales des terres arides en réponse à l’engrais azoté appliqué, modèle à effets fixes sur les ménages

Variables	(1)	(2)	(3)	(4)
Engrais azoté	0.0688*** (0.0227)	0.0654*** (0.0243)	0.0420* (0.0238)	0.0506* (0.0258)
Fumier		0.0309*** (0.00756)	0.0310*** (0.00784)	0.0318*** (0.00877)
Composte		-0,0338 (0.0342)	-0,0274 (0.0331)	-0,0188 (0.0367)
Autres engrais		0,0483 (0.0565)	0,0189 (0.0564)	0,0128 (0.0569)
Pesticide		0,272 (0.198)	0.363* (0.193)	0.528** (0.261)
Fongicides		0,227 (0.252)	0,147 (0.235)	0,164 (0.249)
Herbicide		0.253** (0.118)	0.0637 (0.124)	0.0231 (0.135)
Autres liquides		0,978 (1.164)	1,222 (1.081)	1,583 (1.115)
Main d'œuvre		0.440*** (0.0277)	0.327*** (0.0305)	0.270*** (0.0366)
Semence locale			0.359*** (0.0360)	0.311*** (0.0411)
Semence améliorée			0.502*** (0.0685)	0.445*** (0.0794)
Mil	-0.325*** (0.0593)	-0.0236 (0.0641)	0.137** (0.0674)	0.200** (0.0787)
Sorgho	-0.486*** (0.0505)	-0.251*** (0.0546)	-0.0969* (0.0572)	-0.0196 (0.0686)
Superficie de la parcelle				-0.0249*** (0.00488)
Distance par rapport à la				0.0177* (0.00905)
Plaine				0.0353 (0.126)
Plateau				0.00978 (0.163)
Bas-fonds				0.140 (0.189)
Sablonneux				-0.0609 (0.193)
Argile				-0.0344 (0.197)
Structure anti-érosion				0.488** (0.199)
Constant	6.425*** (0.0459)	4.778*** (0.102)	4.244*** (0.114)	4.490*** (0.235)
Observations	3 327	2 840	2 346	1 834

Nombre de ménages	1 374	1 264	1 033	824
Effet marginal des nutriments azotés	8.82	8.33	5.15	5.76

Source: Les auteurs se sont appuyés sur les données du LSMS. Erreurs standard entre parenthèses. La taille des échantillons diminue avec les observations manquantes dans des modèles plus complets, notamment ceux comprenant des quantités de semences. *** $p < 0.01$, ** $p < 0.05$, * $p < 0.1$

Tableau 6: Rendement des céréales des terres arides en réponse à l'engrais azoté appliqué, modèle à effets fixes sur les ménages

Variables	(1)	(2)	(3)	(4)
Engrais azoté appliqué	0.190*** (0,073)	0.218*** (0,081)	0.162** (0,075)	0.149* (0,080)
Fumier		0.026*** (0,008)	0.024** (0,009)	0.026*** (0,010)
Composte		-0.058 (0,038)	-0.044 (0,037)	-0.033 (0,041)
Autres engrais organiques		0.051 (0,066)	0.024 (0,066)	0.022 (0,067)
Pesticide		0.253 (0,211)	0.304 (0,201)	0.304 (0,280)
Fongicides		0.076 (0,272)	0.029 (0,248)	0.082 (0,259)
Herbicide		0.104 (0,137)	-0.063 (0,134)	-0.095 (0,144)
Autres liquides protecteurs		0.673 (1,285)	0.769 (1,178)	0.967 (1,202)
Main d'œuvre totale		0.447*** (0,030)	0.335** (0,033)	0.283*** (0,039)
Semence locale			0.353** (0,039)	0.294*** (0,044)
Semence améliorée			0.488** (0,073)	0.417*** (0,085)
Mil	-0.159* (0,090)	0.071 (0,093)	0.249** (0,096)	0.295** (0,117)
Sorgho	-0.393*** (0,075)	-0.188** (0,077)	-0.036 (0,079)	0.053 (0,101)
Superficie de la parcelle				-0.025*** (0,005)
Distance (km) depuis le domicile				0.017* (0,009)
Plaine				-0.008 (0,130)
Plateau				-0.019 (0,170)
Bas-fonds				-0.005 (0,210)
Sablonneux				-0.032 (0,210)
Argile				-0.028 (0,212)
Structure anti-érosion				0.486** (0,198)
Observations	2 453	2 043	1 707	1 307
Nombre de ménages	776	671	548	425
Kleibergen Paap F	218.6	155.8	148.3	112.5
Effet marginal de N	23.13	26.95	19.49	16.81

Source: Les auteurs se sont appuyés sur les données du LSMS. Erreurs standard entre parenthèses. *** p<0.01,

** p<0.05, * p<0.1 La taille des échantillons diminue avec les observations manquantes dans des modèles plus

complets, notamment ceux comprenant des quantités de semences.

Tableau 7 : Réponse du rendement du mil à l'engrais azoté appliqué, modèle à effets fixes sur les ménages

Variables	(1)	(2)	(3)	(4)
Engrais azoté	0.0392 (0.0724)	-0.00945 (0.0685)	0.00449 (0.0642)	-0.00372 (0.0714)
Fumier		0.0271** (0.0122)	0.0222* (0.0122)	0.0156 (0.0137)
Composte		-0.0774 (0.0754)	-0.0518 (0.0744)	-0.0751 (0.0862)
Autre engrais		0.0832 (0.0720)	0.0806 (0.0676)	0.0803 (0.0657)
Fongicides		-0.668 (1.004)	-0.630 (0.938)	-1.261 (0.923)
Herbicide		2.565 (10.59)	0.960 (9.893)	2.138 (9.408)
Main d'œuvre totale		0.470*** (0.0481)	0.314*** (0.0529)	0.156*** (0.0602)
Semence locale			0.409*** (0.0652)	0.360*** (0.0698)
Semence améliorée			0.550*** (0.208)	0.350 (0.259)
Superficie de la parcelle				-0.0310*** (0.00828)
Distance par rapport à la parcelle				0.0334** (0.0150)
Plaine				0.0543 (0.186)
Plateau				0.0202 (0.314)
Bas-fonds				-0.220 (0.383)
sablonneux				-0.00658 (0.411)
Argile				0.411 (0.448)
Structure anti-érosion				1.789*** (0.369)
Constant	5.996*** (0.0282)	4.633*** (0.139)	4.267*** (0.150)	4.635*** (0.466)
Observations	1 376	1 182	1 018	813
Nombre de ménages	771	688	585	476
Effet marginal	10.37	-2.34	0.99	-0.81
Élément nutritif				

Source: Les auteurs se sont appuyés sur les données du LSMS. Erreurs standard entre parenthèses. *** p<0.01, ** p<0.05, * p<0.1 La taille des échantillons diminue avec les observations manquantes dans des modèles plus complets, notamment ceux comprenant des

quantités de semences.

Tableau 8 : Réponse du rendement du Sorgho à l'engrais azoté appliqué, modèle à effets fixes sur les ménages

Variables	(1)	(2)	(3)	(4)
Engrais azoté appliqué	0.0503 (0.0590)	0.0663 (0.0545)	0.0265 (0.0582)	0.0399 (0.0579)
Fumier		0.0356 (0.0220)	0.0411* (0.0245)	0.0301 (0.0250)
Composte		-0.184 (0.441)	0.432 (1.146)	4.949 (5.166)
Autre engrais biologique		-1.010 (1.889)	-1.025 (1.878)	-0.910 (1.724)
Fongicides		2.347** (1.168)	2.081* (1.157)	4.539*** (1.726)
Herbicides		0.0986 (0.281)	0.0539 (0.310)	0.0319 (0.295)
Main d'œuvre totale		0.496*** (0.0567)	0.316*** (0.0704)	0.309*** (0.0761)
Semence locale			0.269*** (0.0828)	0.264*** (0.0864)
Semence améliorée			0.655*** (0.202)	0.444** (0.213)
Pesticide		-0.727 (1.605)	-3.386 (5.036)	-23.47 (23.03)
Superficie de la parcelle				-0.00449 (0.00972)
Distance par rapport à la parcelle				-0,0140 (0.0151)
Plaine				-0.0652 (0.250)
Plateau				-0.291 (0.388)
Bas-fonds				0.0337 (0.310)
Sablonneux				-0.325 (0.432)
Argileux				-0.456 (0.401)
Structure anti-érosion				-0.171 (0.441)
Constant	5.961*** (0.0297)	4.389*** (0.175)	4.351*** (0.202)	4.985*** (0.462)
Observations	1 170	1 001	816	664
Nombre de ménages	767	666	534	445

Effet marginal d'azote	9.56	11.70	4.73	6.44
Nutriments appliqués				

Source: Les auteurs se sont appuyés sur les données du LSMS. Erreurs standard entre parenthèses. *** $p < 0.01$, ** $p < 0.05$, * $p < 0.1$ La taille des échantillons diminue avec les observations manquantes dans des modèles plus complets, notamment ceux comprenant des quantités de semences.

Tableau 9 : Réponse du rendement du maïs à l'engrais azoté appliqué, modèle à effets fixes sur les ménages

Variables	(1)	(2)	(3)	(4)
Engrais azoté appliqué	0.0658 (0.0541)	0.146** (0.0676)	0.000670 (0.0638)	-0.0620 (0.0747)
Fumier		0.00286 (0.0268)	0.00169 (0.0237)	0.0125 (0.0275)
Composte		-0.0796 (0.0639)	-0.0520 (0.0585)	-0.0646 (0.0755)
Autres engrais		0.218 (0.147)	0.435* (0.231)	0.420 (0.290)
Fongicides		-0.0489 (0.509)	-0.367 (0.442)	0.0470 (1.038)
Herbicides		-0.0469 (0.226)	-0.236 (0.276)	0.129 (0.329)
Main d'œuvre totale		0.540*** (0.0786)	0.403*** (0.0849)	0.443*** (0.111)
Semence locale			0.662*** (0.114)	0.706*** (0.186)
Semence améliorée			0.719*** (0.133)	0.572*** (0.182)
Pesticide		0.366 (0.290)	0.459 (0.291)	-0.242 (0.669)
Autres liquides		0.887 (1.170)	0.891 (1.014)	-0.176 (1.168)
Superficie de la parcelle				-0.0541*** (0.0147)
Distance par rapport à la parcelle				0,0902 (0.0768)
Plaine				0,0520 (0.590)
Plateau				-0.564* (0.335)
Bas-fonds				1.806* (0.923)
Sablonneux				0.368 (0.589)
Argileux				-0.207 (0.627)
Structure anti-érosion				1.016* (0.514)
Constant	6.603*** (0.0787)	4.623*** (0.260)	3.614*** (0.319)	3.386*** (0.710)
Observations	781	657	512	357
Nombre de ménages	559	481	369	264
Effet marginal de l'azote Nutriments appliqués	5,01	11,33	0,049	-3,83

Source: Les auteurs se sont appuyés sur les données du LSMS. Erreurs standard entre parenthèses. *** p<0.01, ** p<0.05, * p<0.1 La taille des échantillons diminue avec les

observations manquantes dans des modèles plus complets, notamment ceux comprenant des quantités de semences.

Tableau 10. Réponse de rendement du maïs-sorgho incluant les éléments nutritifs mesurés dans le sol, Savane soudanienne

	(1) linéaire	(2) interaction	(3) quadratique et interaction
Nutriments azotés / ha	2,864 (1,974)	4,356 (2,646)	10.42* (5,543)
Parcelle de sorgho	-596.8*** (131,5)	-502.7*** (156,6)	-351.7* (197,8)
Parcelle de sorgho x Nutriments azotés / ha		-5,593 (3,576)	-9.134* (4,669)
(Nutriments azotés / ha) ²			-0,0381 (0,0300)
Fumier	80,40 (117,1)	73,30 (117,4)	83,28 (117,9)
Main d'œuvre	3.099*** (1,020)	3.051*** (1,015)	3.155*** (1,013)
Herbicides	15,05 (27,43)	17,00 (27,46)	18,11 (27,03)
Équipement	0.721*** (0,153)	0.724*** (0,153)	0.724*** (0,152)
Distance par rapport à la parcelle	-3.374* (1,744)	-3.338* (1,732)	-3.343* (1,731)
Structure de lutte contre l'érosion des sols	-78,13 (100,8)	-81,10 (101,7)	-82,52 (103,3)
Association de légumineuse	-238.8*** (88,85)	-233.1*** (86,80)	-236.5*** (85,86)
lnN	-90,00 (71,55)	-94,77 (70,75)	-81,98 (69,99)
lnC	-92,00 (61,40)	-84,60 (62,12)	-89,99 (61,85)
lnP	137.2*** (47,61)	146.6*** (47,33)	149.7*** (47,14)
lnK	-58,34 (65,13)	-65,67 (66,11)	-61,44 (65,56)
lnPh(kcl)	191,6 (430,7)	150,2 (436,8)	286,6 (434,8)
Sable	14,18 (17,97)	15,36 (18,41)	14,66 (18,48)
Limon	17,07 (18,35)	17,93 (18,76)	17,23 (18,82)
Argile	60.80** (27,67)	63.77** (28,17)	62.86** (28,01)

Précipitations	-0,552 (1,339)	-0,306 (1,335)	-0,0562 (1,363)
Constant	-1 707 (2 235)	-1 891 (2 279)	-2 230 (2 305)
Observations (n parcelles)	643	643	643
R-carré	0,518	0,520	0,523

Source: Les auteurs se sont appuyés sur les données de la Savane soudanienne. Erreurs standard robustes entre parenthèses. *** p<0.01, ** p<0.05, * p<0.1

Tableau 11: Rendement du maïs-sorgho, y compris le type de sol perçu par les agriculteurs, Savane soudanienne

	(1) Combiné	(2) Maïs	(3) Sorgho
Nutriments azotés / ha	10.52** (4,501)	14.43*** (5,427)	3,634 (4,065)
Parcelle de sorgho	-273.1** (112,1)		
Parcelle de sorgho x Nutriments azotés / ha	-6.608** (3,238)		
(Nutriments azotés / ha) ²	-0,0102 (0,0454)	-0,0471 (0,0569)	-0,00551 (0,0653)
Fumier	89,49 (58,60)	229.4** (90,18)	-43,94 (68,72)
Main d'œuvre	2.184*** (0,693)	4.015*** (1,084)	1.802** (0,800)
Herbicides	-0,835 (14,89)	-7,904 (26,35)	4,472 (16,08)
Équipement	0.391*** (0,103)	-0,0169 (0,182)	0.541*** (0,0723)
Distance par rapport à la parcelle	-1,344 (1,656)	-1,193 (4,444)	-2.053* (1,099)
Structure anti-érosion des sols	161.5** (71,43)	195,8 (120,4)	149.0** (75,23)
Cultures de légumes	-386.8*** (54,41)		-320.8*** (56,26)
Plaine	-65,03 (127,2)	-10,85 (158,1)	3,302 (81,89)
Bas-fonds		-67,34 (504,9)	144,9 (150,9)
Pente	-63,54 (152,2)		
Sablonneux	137.2* (74,00)	-27,07 (119,0)	77,60 (52,43)
Limoneux	114,8 (78,54)		
Argileux	149.8* (81,99)	-159,2 (123,7)	168.2** (78,65)
Graveleux		-176,5 (159,3)	-80,07 (68,94)
Précipitations	0,447 (0,936)	3.576** (1,657)	-1.603* (0,911)

Constant	402,2 (262,3)	-404,1 (456,5)	666.5*** (251,1)
Observations	1 086	421	665
R-carré	0,410	0,198	0,387

Source: Les auteurs se sont appuyés sur les données de la Savane soudanienne. Erreurs standard robustes entre parenthèses. *** $p < 0.01$, ** $p < 0.05$, * $p < 0.1$

Tableau 12. Réponse de rendement de maïs-sorgho à l'azote appliqué, approche de la fonction de contrôle

	(1)
Engrais azoté	23.98*** (5,035)
Résiduel, étape 1	-16.33*** (3,916)
Parcelle de sorgho	622.1*** (236,6)
Parcelle de sorgho x Nutriments azotés / ha	-5.565* (3,110)
(Nutriments azotés / ha) ²	0,00795 (0,0439)
Fumier	180.7*** (60,61)
Main d'œuvre	3.365*** (0,777)
Herbicides	-3,601 (15,01)
Équipement	0.351*** (0,101)
Distance par rapport à la parcelle	-3.118* (1,816)
Structure anti-érosion des sols	115,5 (70,55)
Association de légumineuse	-524.4*** (65,38)
Plaine	-100,5 (119,9)
Pente	-120,4 (144,2)
Sablonneux	-10,72 (76,59)
Limoneux	35,67 (80,92)
Argileux	173.7** (77,86)
Précipitations	-0,540 (0,979)
Constant	-18,04 (262,7)
Observations	1 086
R-carré	0,424

Source: Les auteurs se sont appuyés sur les données de la Savane soudanienne. Erreurs standard robustes entre parenthèses.

*** p<0.01, ** p<0.05, * p<0.1

Bibliographie

Abate, T., N. Coulibaly, A. Menkire, B. Wawa. 2015. Maize in Mali: Successes and Opportunities. Drought Tolerant Maize in Africa Quarterly Bulletin 4(1): 1-2. International Maize and Wheat Improvement Center (CIMMYT-Kenya).

Ahmed, M., J. Gaskell et M. Gautam. 2017. Is There Potential for Dryland Agriculture? Some Evidence from Mali. Manuscrit. Pôle Agriculture, Banque Mondiale, Washington, DC.

Assima, A., N. Keita, A. Kergna, M. Smale, et S. Haggblade. 2017. Rapport technique sur l'approche méthodologique de l'enquête Projet GISAIA. Document de Travail 44. Feed the Future Innovation Lab for Food Security Policy, Mali. Michigan State University.

Banque mondiale, 2017. Base de données. Disponible à l'adresse suivante :

<http://databank.worldbank.org/data/home.aspx>

Bazile, D., S. Dembélé, M. Soumaré, D. Dembélé. 2008. Utilisation de la diversité variétale du sorgho pour valoriser la diversité des sols du Mali. *Cahiers Agricultures* 17(2) : 86-94

Bishop et Allen 1989.

Benjamin, D. (1995). Can unobserved land quality explain the inverse productivity relationship?. *Journal of Development Economics*, 46(1), 51-84.

Bishop, J., et J. Allen. 1989. The On-Site Costs of Soil erosion in Mali. Environment Department Working Paper, No. ENV 21. Banque Mondiale, Washington, DC.

Coulibaly, Ntji. 2008. Fiche Technique sur les Variétés de Maïs au Mali. Institut d'Economie Rurale, Mali. Manuscrit.

CountryStat 2017. Base de données. Disponible à l'adresse suivante :

<https://countrystat.org/home.aspx?c=MLI>

Dicko, M., M. Koné, L. Traoré, C. H. Diakité, N. Kamissoko, B. Sidibé, Z. Kouyaté, D. Sogodogo, L. Dioni, H. Konaré, et A. Gakou. 2016. Optimizing fertilizer use within the context of integrated soil fertility management in Mali. In: *Fertilizer Use Optimization in Sub-Saharan Africa*. C. S. Wortmann and K. (eds). CAB International, Nairobi, Kenya.

Doumbia, M.D., L.R. Hossner, et A.B. Onken. 1993. Variable sorghum growth in acid soils of subhumid West Africa. *Arid Soil Research and Rehabilitation* 7: 335-346.
doi:10.1080/15324989309381366.

Foltz, J., U. Aldana, et P. Laris. 2012. The Sahel's Silent Maize Revolution: Analyzing Maize Productivity in Mali at the Farm-Level. Working Paper 17801.

<http://www.nber.org/papers/w17801>.

- Gebremedhin, B., & Swinton, S. M. (2003). Investment in soil conservation in northern Ethiopia: the role of land tenure security and public programs. *Agricultural economics*, 29(1), 69-84.
- Guirkinger, C., J.-P. Platteau, et T. Goetghebuer. 2015. Productive inefficiency in extended agricultural households: Evidence from Mali. *Journal of Development Studies* 116 (2015): 17-27.
- Kazianga, H., et Wahhaj. 2013. Gender, social norms, and household production in Burkina Faso. *Economic Development and Cultural Change*, 61(3): 539-576.
- Kihara, J. G. Nziguheba, S. Zingore, A. Coulibaly, A. Esilaba, V. Kabambe, S. Njoroge, C. Palm, et J. Huising. 2016. Understanding variability in crop response to fertilizer and amendments in sub-Saharan Africa. *Agriculture, Ecosystems, and Environment* 229: 1-12.
- Kone, Y., B. Teme, J. Tefft, J. Dorsey. 2016. Food security challenge in Africa: Fertilizer subsidy efficiency issue in Mali. Manuscrit, Bamako.
- Koussoube, E. et Nauges, C. 2017. Returns to fertilizer use: Does it pay enough? Some new evidence from Sub-Saharan Africa. *European Review of Agricultural Economics*, 44(2): 183-210.
- Macauley, H. et Ramadjita, T. 2015. Cereal crops: rice, maize, millet, sorghum and wheat. Feeding Africa. Background Paper. 21-23 Octobre 2015. Dakar: Sénégal
- Marenya, P. et Barrett, C. 2009. State-conditional fertilizer yield response on western Kenya Farms. *American Journal of Agricultural Economics*, 91(4): 991-1006.
- Mason, S.C., K. Ouattara, S.J.B. Taonda, S.B. Pale, A. Sohoro, et D. Kabore. 2014. Soil and cropping system research in semi-arid West Africa as related to the potential for conservation agricultural. *International Journal of Agricultural Sustainability*. doi: 10.1080/14735903.2014.945319.
- Matlon, P. 1983. The Technical Potential for Increased Food Production in the West African Semi-Arid Tropics. Paper presented at the Conference on Accelerating Agricultural Growth in Sub-Saharan Africa, Victoria Falls, Zimbabwe. 29 August-1 September 1983.
- New Partnership for Africa's Development (NEPAD). 2003. *Comprehensive Africa Agriculture Development Programme*. Union Africaine et NEPAD. Juillet.
- Omonona, B.T., L.S.O. Liverpool-Tasie, A. Sanou, et W. Ogunleye. 2016. The profitability of inorganic fertilizer use in sorghum production: Evidence from Nigeria. Policy Paper, Guiding Investments in Sustainable Agricultural Intensification in Africa (GISAIA), Spring. Michigan State University, East Lansing.
- Unité de la Planification et de la Statistique, Ministère du Développement Rural, Mali. 2016. Document d'informations de base. Enquête Agricole de Conjoncture Intégrée aux Conditions de Vie des Ménages 2014. Bamako, Mali. Septembre

Rattunde, H.F.W., E. Weltzien, B. Diallo, A.G. Diallo, M. Sidibe, A.O. Touré, A. Rathore, R.R. Das, W.L. Leiser, et Al. Touré. 2013. Yield of photoperiod-sensitive sorghum hybrids based on Guinea-race germplasm under farmers' field conditions in Mali. *Crop Science* 53 (November-December): 1-8.

Rattunde, F., M. Sidibé, B. Diallo, E. van den Broek, H. Somé, K. vom Brocke, A. Diallo, B. Nebie, A. Touré, K. Isaacs, et E. Weltzien. A paraitre. Involving women farmers in variety evaluations of a “men’s crop”: Consequences for the sorghum breeding strategy and farmer empowerment in Mali. In H. A. Tufan, S. Grando and C. Meola (eds.), *State of the Knowledge for Gender in Breeding: Case Studies for Practitioners*. CGIAR Gender and Breeding Initiative Working Document #3.

Sheahan, M., Black, R., et Jayne, T.S. 2013. Are Kenyan farmer under-utilizing fertilizer? Implication for input intensification strategies and research. *Food Policy*, 41: 39-52.

Smale, M., A. Assima, A. Kergna, A. Traoré, N. Keita. 2015. Survey Research Report: Diagnostic Survey of Sorghum Production in the Sudanian Savanna. FSP Innovation Lab Working Paper No. Mali-2015-1. East Lansing, Michigan State University.

Smale, M., L. Diakitè, et N. Keita. 2016. Location, vocation, and price shocks: cotton, rice and sorghum-millet farmers in Mali. In M.J. Cohen and M.Smale, *Global Food-Price Shocks and Poor People*. Development in Practice Books. Routledge, UK. Pp 136-149.

Sparks, D.L., A. L. Page, P.A. Helmke, R. H. Loeppert, P. N. Soltanour, M.A. Tabatabai, C.T. Johnston, et M.E. Sumner. 1996. Methods of soil analysis. Part 3 – Chemical methods. *SSSA Book Series 5*. Madison, WI (USA).

Tappan, G. et M. McGahuey. 2007. Tracking environmental dynamics and agricultural intensification in southern Mali. *Agricultural Systems* 94: 38-51.

Thériault, V., M. Smale et A. Assima. A paraitre. The Malian fertilizer value chain post-subsidy: An analysis of its structure and performance. *Development in Practice*. <https://doi.org/10.1080/09614524.2018.1421145>.

Theriatult, V. M. Smale and H. Haider 2017. Maize Yield Response to Fertilizer under Differing Agro-Ecological Conditions in Burkina Faso. International Development Working Paper 155. Michigan State University, East Lansing.

Traore, K., D. K. Sidibe, H. Coulibaly et J. Bayala. 2017. Optimizing yield of improved varieties of millet and sorghum under highly variable rainfall conditions using contour ridges in Cinzana, Mali. *Agriculture and Food Security* 6:11. DOI 10.1186/s4066-016-0086-0. et al. (millet).

Udry, C. 1996. Gender, agricultural production, and the theory of the household. *Journal of Political Economy* 104 (5): 1010-1046.

Weil, R.R., and N.C. Brady. 2016. *The Nature and Properties of Soils*. 15th edition. Pearson Education Limited. Essex, Angleterre.

Xu, Z., Z. Guan, T. S. Jayne, et R. Black. 2009. Factors influencing the profitability of fertilizer use on maize in Zambia. *Agricultural Economics*, 40:437-446 Xu et al. 2009.

Yanggen, D., Kelly, V., Reardon, T., Naseem, A. 1998. Incentives for fertilizer use in sub-Saharan Africa: A review of empirical evidence on fertilizer response and profitability. MSU International Development Working Papers, No. 70. Department of Agricultural, Food, and Resource Economics, Michigan State University, East Lansing.

Annexe 1: tri des données du LSMS

Les superficies de la parcelle (ha) ont été mesurées à l'aide des coordonnées GPS. Ce sont des estimations continues et potentiellement plus fiables que les valeurs auto déclarées, qui présentent des valeurs cumulées avec des valeurs entières (et autres) (voir la figure 1 en annexe). Les coordonnées GPS ont été collectées dans la plupart des parcelles (97%). Par conséquent, leur utilisation ne conduit pas à davantage de valeurs manquantes ni à une taille d'échantillon plus petite. Étant donné que l'analyse est très sensible aux valeurs aberrantes, nous ajustons de 1% les plus petites et les plus grandes parcelles,

La quantité de différents types d'engrais a été rapportée en unités standards (kg ou sacs) et en unités non standard (charrette à âne et charrette à bœufs). Nous avons considéré que les charrettes se référaient au transport plutôt qu'aux quantités réelles. L'application des conversions recommandées pour les charrettes a donné d'énormes quantités d'engrais qui dépassant de 10 fois des quantités recommandées. Comme nous ne savons pas comment élaguer de façon significative ces observations, nous n'avons effectué l'analyse que pour les unités normalisées et avons également plafonné N kg/ha à 300.

Pour chaque culture, les 5% les plus élevés de la quantité d'engrais (azote kg/ha) ont également été élagués. De même, nous élaguons de 1% les valeurs les plus élevées des autres matériels et de la main-d'œuvre. Étant donné que ces entrées ne sont pas utilisées sur toutes les parcelles, nous n'élaguons pas moins de 1% des valeurs (ce qui correspond à une quantité nulle, ce qui est courant). Lorsque deux entrées ont des quantités extrêmement élevées, elles sont rapportées. Les 5 premières valeurs en percentile de la quantité de fumier (composte), mesurées en kg/ha, pour le mil, le sorgho et le maïs sont 17148 (731), 10823 (175) et 32258 (5586). Ces valeurs donnent des taux moyens de fumier et de composte nettement plus élevés que la valeur autorisée. Par conséquent, nous élaguons 5% sur les quantités de fumier et de composte les plus élevées au lieu des 1%.

Étant donné que le rendement des cultures est la variable dépendante, nous élaguons également les queues de sa distribution. Alors que les rendements étaient destinés à être mesurés en calculant objectivement les rendements des sous-parcelles, ils étaient fondés sur la production obtenue sur les parcelles dont se rappelaient les agriculteurs, divisée par les zones de parcelles. Des erreurs de mesure peuvent provenir de nombreuses sources, notamment des difficultés à se souvenir de la production désagrégée par parcelle et des unités non standard (chariot, grenier, sac, bassin, panier) de conversion. Environ 2% des parcelles de céréales n'avaient pas été entièrement récoltées au moment de l'enquête. Des rendements supérieurs à environ 4 000 kg / ha sont effacés/annulés pour le mil et le sorgho, et 6 000 kg/ha pour le maïs, car atteignant la barre des chiffres irréalistes pour les conditions de croissance du Mali et risquent de constituer des erreurs dans les données. Bien que les rendements moyens en sorgho soient de 4,5 t / ha aux États-Unis, ils atteignent 7 t/ha en Inde, Rattunde et al. (2013) rapportent une quantité maximum de près de 3 t/ha malgré les conditions des agriculteurs avec des hybrides de sorgho dans la Savane soudanienne, une zone plus productive. Bien que les agriculteurs puissent atteindre la barre des 4 t/ha de mil dans les zones irriguées de l'Inde, nous ne trouvons pas de rendements de

mil supérieurs à 1,4 t / ha rapportés au Mali dans la zone sahélienne (Traoré et al. 2017). En ce qui concerne le maïs, les estimations les plus élevées que nous avons vues sont rapportées par Coulibaly (8 000). En raison de ces décisions, nos estimations des queues de sa distribution peuvent ne pas être très précises. Cependant, comme nous nous intéressons à l'effet des engrais sur l'agriculteur typique, nous nous assurons que les valeurs extrêmes n'influencent pas les résultats.

Plusieurs cultures sont pratiquées sur plusieurs parcelles. Cela conduit à de nombreux problèmes. L'un est que toute la superficie de la parcelle n'est pas dédiée à la culture et que l'engrais appliqué sera également utilisé pour l'autre culture. Bien que dans les données, il est demandé aux répondants quelle est la proportion de la parcelle dédiée à chaque culture, il s'agit probablement d'une mesure imprécise, car les cultures poussent généralement les unes à côté des autres, plutôt que de diviser la parcelle en sections distinctes pour chaque culture. En outre, le type de culture intercalaire est important: certaines cultures absorbent plus d'azote contrairement à d'autres.

Certaines cultures, comme les légumes, contribuent à la fixation de l'azote, ce qui peut améliorer le rendement de l'autre culture au cours des saisons successives. Pour surmonter ces problèmes, seules des parcelles à culture unique sont conservées dans l'échantillon. Cela conduit à 456 (20,0%), 311 (17,6%) et 154 (10,3%) des parcelles de mil, de sorgho et de maïs étant supprimées de l'échantillon. L'inclusion des parcelles où plusieurs cultures sont associées dans l'analyse n'a pas amélioré les résultats.

Une autre caractéristique des données est que les quantités de semences ne sont pas rapportées pour environ 603 parcelles, probablement parce que les agriculteurs qui plantent des semences locales ne les mesurent pas comme il se doit. Étant donné que cela réduit la taille de l'échantillon, le modèle est estimé avec et sans les variables de semences.

Annexe 2: Figures et tableaux supplémentaires

Figure 1 : Dimensions de la parcelle (Rapportées automatiquement à partir de mesures GPS)

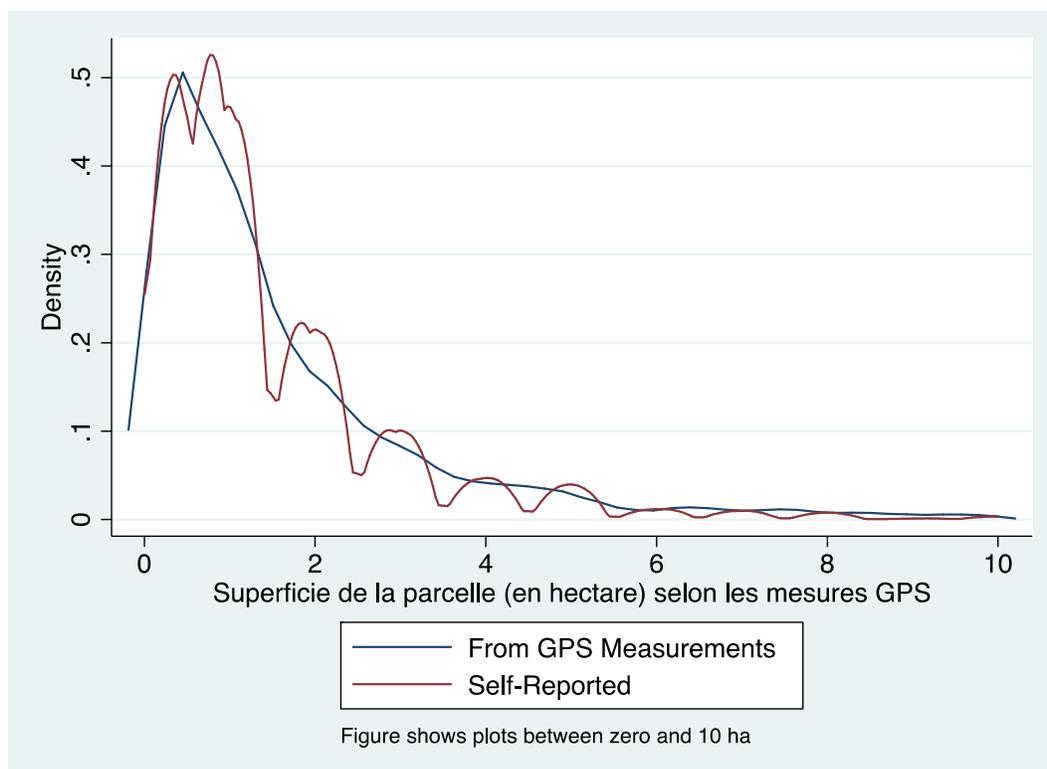


Tableau Annexe 2: La réponse de rendement des céréales des terres arides à l'engrais azoté appliqué, modèle des effets fixes sur les ménages

Variables	(1)	(2)	(3)	(4)
Engrais azoté	4.091*** (0.793)	4.289*** (0.801)	4.100*** (0.800)	4.066*** (0.856)
Mil	-439.1*** (45.66)	-204.1*** (47.57)	-132.1*** (49.66)	-85.36 (60.09)
Sorgho	-479.3*** (38.61)	-275.5*** (40.15)	-205.3*** (41.78)	-152.5*** (51.93)
Fumier		0.0192*** (0.00472)	0.0210*** (0.00506)	0.0239*** (0.00607)
Composte		-0.159* (0.0891)	-0.153* (0.0850)	-0.157* (0.0897)
Autre engrais		0.669* (0.398)	0.589 (0.381)	0.496 (0.399)
Pesticide		233.0*** (45.05)	282.6*** (43.22)	214.4*** (65.72)
Fongicides		93.80** (37.19)	92.68*** (34.10)	106.5*** (35.68)
Herbicide		80.45*** (28.61)	-11.13 (34.17)	-24.27 (39.04)
Autres liquides		378.8 (558.1)	685.9 (516.9)	838.1 (598.2)
Main d'œuvre totale		2.516*** (0.264)	1.661*** (0.282)	1.583*** (0.345)
Semence locale			4.854*** (1.177)	5.080*** (1.430)
Semence améliorée			36.63*** (6.220)	45.34*** (7.795)
Superficie de la parcelle				-10.08*** (3.524)
Distance (km) depuis le domicile				1,045 (6.984)
Plaine				81.99 (96.81)
Plateau				-28.94 (125.6)
Bas-fonds				169.8 (145.2)
Sol sablonneux				-247.9* (147.7)
Sol argileux				-241.9 (151.4)
Structure anti-érosion				153.2 (153.0)
Constant	1 186*** (32.80)	799.9*** (39.14)	701.1*** (43.52)	839.7*** (156.7)
Observations	3 327	2 840	2 346	1 834
Nombre de ménages	1 374	1 264	1 033	824

Source: Les auteurs se sont appuyés sur les données du LSMS. Erreurs standard entre parenthèses. *** p<0.01, ** p<0.05, * p<0.1

Tableau Annexe 3: La réponse de rendement des céréales des terres arides au nutriment azoté appliqué, variables instrumentales - modèle des ménages à effets fixes

Variables	(1)	(2)	(3)	(4)
Engrais azoté	23.565*** (5.254)	33.371*** (9.224)	38.603*** (9.320)	34.181*** (9.822)
Mil	-105.839 (97.107)	117.054 (129.289)	339.496** (153.750)	428.309** (197.919)
Sorgho	- (80.085)	-15.471 (105.556)	148.630 (122.590)	268.860 (166.956)
Fumier		0.013* (0.007)	0,009 (0.009)	0,013 (0.010)
Composte		-0.436*** (0,150)	-0.509*** (0,165)	-0.447*** (0,165)
Autre engrais		1.024* (0,622)	1.243* (0,695)	1.109 (0,702)
Pesticides		234.533** (64.555)	245.439*** (70.682)	94.373 (109.551)
Fongicides		72.295 (51.835)	71.502 (54.208)	88.921 (54.375)
Herbicides		-106.563 (71.729)	-165.096** (69.203)	-126.611* (68.767)
Autres liquides		448.849 (829.479)	417.763 (878.428)	364.978 (995.815)
Main d'œuvre totale		1.981*** (0,416)	1.848*** (0,486)	1.905*** (0,576)
Semence locale			1.107 (2,114)	1.248 (2,484)
Semence améliorée			35.782*** (10,083)	39.444*** (12,286)
Superficie de la parcelle				-19.208*** (6,411)
Distance (km) depuis le domicile				10,979 (11,363)
Plaine				-10,457 (155,981)
Plateau				-118,765 (200,955)
Bas-fonds				-228,326 (269,173)
Sol sablonneux				-281,665 (244,712)
Sol argileux				-352,897 (248,718)
Structure anti-érosion				215,939 (234,328)
Observations	2 453	2 043	1 707	1 307
Nombre de ménages	776	671	548	425
Kleibergen Paan F	57.02	21.54	23.62	16.84

Source: Les auteurs se sont appuyés sur les données du LSMS. Erreurs standard entre parenthèses. *** $p < 0.01$, ** $p < 0.05$, * $p < 0.1$

Annexe 3: Protocole d'échantillonnage de sol pour une représentation totale des parcelles des petites exploitations (Sieglinde Snapp, communication personnelle.)

Le but de ce protocole est d'obtenir un composite (échantillon global) représentatif du sol des parcelles agricoles (<0,4 hectares).

Fournitures:

- seau ou godet de 10 litres (le bassin fonctionne également) **SEAU PROPRE ENTRE LES CHAMPS**
- Tarière OU plantoir
- Sacs d'échantillonnage pour stocker la terre (par exemple, des sacs en plastique résistants)

Procédure:

- 1) Se familiariser avec les dimensions de la parcelle
 - a. Savoir où sont les limites du champ
- 2) Prélever des sous-échantillons de sol en suivant un chemin en zigzag (voir les exemples de diagrammes ci-dessous)
- 3) Recueillir des sous-échantillons depuis la crête mais **PAS** dans la jachère
- 4) En partant d'un coin de la parcelle, se diriger vers la deuxième crête, prélever le premier échantillon.
- 5) Recueillir 8 sous-échantillons dans chaque parcelle, chaque échantillon est recueilli à environ 8 pouces de profondeur et placé dans le seau
- 6) Les sous-échantillons doivent être prélevés comme suit: Choisir le processus en fonction de l'outil que vous utilisez pour l'échantillonnage.
 - a. Tarière
 - i. Enlever tous les résidus du site d'échantillonnage (tels que les feuilles et les matières végétales)
 - ii. Insérer la tarière directement dans le sol (20 cm = 8 pouces) en position verticale (*haut et bas*)
 - iii. Retirer délicatement la tarière (éviter tout débordement de l'échantillon). Si le sol est sec au moment de l'échantillonnage, incliner légèrement la tarière vers l'arrière pour éviter qu'elle ne déborde du tube.
 - iv. Placer l'échantillon dans le seau et passez au suivant
 - b. Truelle
 - i. Enlever les résidus (tels que les feuilles et les matières végétales, brossez)
 - ii. Insérer le plantoir verticalement (vers le haut et vers le bas) dans le sol (20 cm = 8 pouces)
 - iii. Pousser doucement sur la poignée et enlever le sol (en veillant à obtenir le sol à la profondeur d'insertion)
 - iv. Placer l'échantillon dans le seau et passer au suivant
- 7) Après que tous les 8 échantillons soient collectés, bien mélanger le sol et le remplir un sac avec.
 - a. Enlever les grosses pierres, bâtons ou racines de l'échantillon
 - b. Briser les mottes de terre avec votre main
 - c. Bien mélanger à la main pendant au moins une minute jusqu'à ce que tout le sol soit homogène
 - d. Recueillir environ le quart de l'échantillon à mettre dans un sac (le sol restant doit être retourné à la parcelle)

- 8) Étiqueter le sac d'échantillon avec les éléments suivants: Fournir un exemple de sac étiqueté
 - a. Date
 - b. Numéro d'identification de l'échantillon