



Université catholique de Louvain

Faculté des bioingénieurs

Earth and Life Institute/ Environmental Sciences

**Déterminants agronomiques et environnementaux de la
variabilité de réponse en rendement des cultures
céréalières à la fertilisation microdose en Afrique
subsaharienne : cas du Burkina Faso**

Yacouba OUEDRAOGO

Janvier 2022

Thèse présentée en vue de l'obtention du grade de
Docteur en sciences agronomiques
et ingénierie biologique

Membres du jury

Président:	Prof Emmanuel Hanert (UCLouvain, Belgique)
Promoteur:	Prof Charles Bielders (UCLouvain, Belgique)
Co-promoteur:	Dr Sibiri Jean-Baptiste Taonda (INERA, Burkina Faso)
Lecteurs :	Prof Bernard Tychon (Université de Liège, Belgique)
	Prof Bertin Pierre (UCLouvain, Belgique)
	Prof Jean Thomas Cornelis (University of British Columbia, Canada)
	Dr Idriss Sermé (INERA, Burkina Faso)

*A mon Père
A ma défunte Mère,
qui nous a quitté pendant la
phase de finalisation de ce document,
je lui rends hommage.
A mon Epouse et à notre Fils*

Remerciements

Cette thèse est le fruit du travail de l'équipe du projet PRD Microferti. Ce projet a été financé par l'Académie de Recherche et d'Enseignement Supérieur (ARES) que je tiens à remercier. La réalisation de cette thèse a impliqué un immense travail de terrain, coordonné par le comité d'accompagnement de la thèse et exécuté avec l'aide d'une équipe de techniciens de terrain sans laquelle cette thèse n'aurait tout simplement pas été possible.

Mes premiers remerciements vont :

Au Pr Charles Bielders. Promoteur de cette thèse, il a assuré avec une grande disponibilité l'encadrement scientifique de ce travail. Durant les 4 ans, les moments de discussions (réunion chaque fin de semaine" ; ouf !) m'ont permis de bénéficier de son expérience scientifique, de ses suggestions et visions critiques. Il m'a guidé dans la formulation des questions et investigations scientifiques qui ont conduit à la réalisation de cette thèse. En résumé, il fut pour moi un "Coach" scientifique dans cette aventure.

Au Dr Sibiri Jean-Baptiste Taonda, co-promoteur de cette thèse. Tout au long de cette thèse, j'ai bénéficié de sa grande expérience dans la conduite d'essais agronomiques à grande échelle dans l'environnement complexe qu'est le milieu paysan. Au-delà des aspects agronomiques, il m'a surtout accompagné dans la subtilité de recherche de *trade-offs* entre exigences scientifiques et fédération de multiples acteurs de terrains (aux objectifs parfois très divergents) autour d'un projet de recherche scientifique. Il n'a pas hésité, comme il le répétait souvent lors de nos échanges, à "*mettre subtilement le pied dans la*

fourmilière" pour assurer le bon déroulement des activités de terrain. Je le remercie grandement pour cette expérience à la fois scientifique, sociale et professionnelle.

Je tiens à remercier les autres membres de mon comité d'accompagnements pour leurs apports critiques et constructifs pour l'accomplissement de ce travail. Il s'agit :

Du Dr Idriss Sermé, pour sa disponibilité, son intérêt constant pour la bonne marche des activités de cette thèse. Il n'a pas hésité à s'impliquer personnellement dans l'exécution de certaines activités de terrain lorsque le chevauchement des activités ne me permettait pas d'être présent sur un site.

Du Pr Bernard Tychon et du Pr Pierre Bertin pour leurs remarques et suggestions qui ont permis d'enrichir et d'améliorer cette thèse tout au long de notre cheminement.

Je n'oublie pas le Pr Emmanuel Hanert (président de jury) et le Prof Jean-Thomas Cornelis qui ont contribué à examiner et à apporter des contributions constructives à cette thèse lors ma défense privée et publique.

Je salue la contribution de toute l'équipe du projet Microferti et du staff de l'INERA Kamboinsin à la réalisation de cette thèse ; particulièrement celle du chef du département GRN/SP Dr Traoré Mamadou, de Epiphane Guiatin, de Augustin Sourwéma, de Sanogo Mamadou et du "brave" Levis Kontiébo. Le projet Microferti a bénéficié de la collaboration de nombreuses personnes et entités que je remercie ici. Je pense au Pr Bismack Nacro, au Dr André Bationo, au

Dr François Lompo, au Dr Emanuel Compaoré, à Fati Saba, à Abdoulaye Kabré de Saria et au réseau MARP. Que les personnes que je n'ai pas pu citer nommément se retrouvent en ces remerciements.

C'est le lieu pour moi de souligner fortement ma reconnaissance aux techniciens de terrain qui ont été le fer de lance de la mise en œuvre opérationnelle des essais agronomiques. Ce sont Bakary Magané, Baba Bognini, Abdoul Rahouf Sarré et le défunt Adama Kabré à qui je rends particulièrement hommage. À la suite des techniciens, je tiens à remercier tous les animateurs endogènes, et particulièrement Sawadogo Ousmane (à Yallé), Ouedraogo Rasmané (à Kagapesgo), Sinaré Mamoudou et Ouedraogo Adama (à Nagréongo) qui ont été le prolongement des bras des techniciens pour la bonne marche des essais.

J'exprime aussi ma gratitude aux producteurs expérimentateurs des trois provinces d'études pour avoir mis à notre disposition leurs parcelles agricoles et pour leurs efforts dans la mise en œuvre des essais. Cette gratitude est particulièrement appuyée pour les représentants des organisations de producteurs que sont Ouedraogo Boureima (chef de Kagapesgo à Gourcy), Sinaré Mamoudou (à Nagréongo), Namoro Arzouma (à Yallé) pour leurs implications personnelles dans l'identification des producteurs et la mise à notre disposition de certaines facilités (infrastructures et logistiques) sur le terrain.

Cette thèse a été réalisée au sein du Groupe GERU du Earth and Life Institute de l'UCLouvain. Ainsi, je remercie tous les académiques pour leurs contributions à l'amélioration de ce travail à travers les séminaires du GERU. Je remercie aussi les équipes des laboratoires GEOG et MOCA ; particulièrement Hélène Dailly et Marco Bravin pour les

analyses des échantillons de sols et d'amendements organiques. En outre, j'ai bénéficié d'un environnement convivial qui a existé entre collègues, chercheurs, doctorants, assistants et techniciens du groupe GERU. *Special thanks* à Alice Alonso, Simon de cannière, Simon Ridley, Ali Mehmandoostkotlar, Adèle Ouedraogo, Sébastien Francois, Aimé Heri-Kazi, Issouf Ouedraogo, Axelle Koch, Alain Kagisye, Kaijun Wu, Jean-Claude Maki Mateso, Mokrane Kadir, Raed Fehri, Jean-Baptiste Got, et Carine De Meyer pour ces moments passés.

Je me souviendrai toujours de la famille Absil (Annick Absil et son époux Ives Absil), une famille belge avec qui j'ai passé des moments conviviaux et qui m'a permis de découvrir la Belgique à travers ses mets et ces lieux touristiques.

Je termine mes remerciements en réitérant toute mon affection à mon épouse Aissatou Napon et à notre fils Akim. Je leur témoigne ma gratitude pour leur patience et soutien permanents durant les longues périodes d'absence au cours de ces 4 dernières années.

Résumé

La fertilisation microdose (FM) est promue en Afrique subsaharienne pour booster la productivité agricole. Cette technique consiste en l'apport localisé de petites quantités d'engrais (2 à 6 g / poquet) aux pieds des plants après la levée. Cependant, la variabilité de la réponse des cultures à la FM peut constituer une barrière à son adoption. Par conséquent, une méta-analyse et des essais agronomiques sur 539 parcelles de producteurs ont été réalisés afin d'identifier les facteurs déterminants la variabilité de la réponse des cultures à la FM au Burkina Faso. Il a été mis en évidence que la réponse de la FM augmente avec la disponibilité en eau, que ce soit à travers la pluviométrie ou la mise en place de techniques de conservation de l'eau du sol. De manière spécifique, les meilleures réponses ont été observées sur les sols de meilleure fertilité inhérente que sont, suivant la classification endogène des sols, les sols noirs, les sols argileux et les sols situés dans les lits majeurs respectivement en zone de pluviométrie de 800 - 1000, de 600 - 800 et de 500 - 600 mm. De manière plus générale, les meilleures réponses ont été observées sur les parcelles qui ont bénéficié de précédents apports modérés d'engrais. Les faibles réponses ont été observées d'une part, sur des parcelles de profondeur de sol < 40 cm, présentant des problèmes d'engorgement d'eau ou un trop faible niveau de fertilité et d'autre part, sur les parcelles ayant bénéficié d'importants apports précédents d'engrais et/ou sur les parcelles nouvellement défrichées. Comparé à la FM appliquée seule, il a été observé une tendance à la réduction de l'effet de la FM lorsqu'elle est combinée avec des amendements organiques (compost, biochar). Ces résultats ont permis d'établir des recommandations pratiques à l'intention des producteurs. D'autres investigations sont cependant nécessaires pour affiner la compréhension de la variabilité de la réponse à la FM.

Table des matières

Remerciements	iii
Résumé.....	vii
Table des matières.....	viii
Liste des figures.....	xiii
Liste des tableaux	xvi
Sigles et abréviations	xviii
Chapitre 1	1
Introduction Générale.....	1
1.1. Contexte de la production agricole en Afrique subsaharienne...	2
1.2. Problématique de la variabilité de la réponse des technologies agricoles en Afrique subsaharienne : cas de la fertilisation microdose	8
1.3. Questions et objectifs de recherche	15
1.3.1. Questions de recherche	15
1.3.2. Objectifs de recherche.....	16
1.4. Description de la zone d'étude.	17
1.5. Plan de la thèse	22
Chapitre 2	25
Factors driving cereal response to fertilizer microdosing in sub-saharan Africa: A meta-analysis.....	25
2.1. Introduction	27

2.2. Materials and methods.....	31
2.2.1. Selection of studies	31
2.2.2. Data extraction and analysis.....	38
2.2.3. Explanation and data quality assessment	41
2.3. Results and Discussion	42
2.3.1. Microdose fertilization response by crop type	42
2.3.2. Microdose fertilization response by climatic zone and observed rainfall.....	43
2.3.3. Microdose fertilization response by soil texture.....	46
2.3.4. Microdose fertilization response according to the dose and type of nutrient provided.....	49
2.3.5. Microdose fertilization response by type of associated practice.....	53
2.3.6. Research needs.....	55
2.4. Conclusions	57
Chapitre 3.....	59
Drivers of sorghum response to fertilizer microdosing in smallholder farms across Burkina Faso	59
3.1. Introduction	62
3.2. Materials and methods.....	64
3.2.1. Study area	64
3.2.2. Set-up of on-farm trials	65
3.2.2.1. Identification of trial plots	65

3.2.2.2. Trials.....	70
3.2.3. Data collection	71
3.2.4. Data analysis.....	72
3.3. Results.....	75
3.3.1. Year and trial characteristics	75
3.3.2. Sorghum grain yield and yield response variability to fertilizer microdosing	79
3.3.3. Factors explaining variability in sorghum grain yield response to fertilizer microdosing	83
3.4. Discussion	93
3.4.1. Factors of variability in sorghum response to fertilizer microdosing.....	93
3.4.2. Recommendation domains for better sorghum response to fertilizer microdosing	100
3.4.3. Challenges in better understanding response variability.	102
3.5. Conclusions	103
Chapitre 4.....	105
L'apport d'amendements organiques permet-il d'améliorer le gain de rendement dû au microdosage d'engrais ? Cas du sorgho dans les petites exploitations familiales du Burkina Faso.....	105
4.1. Introduction	106
4.2. Matériels et méthodes	110
4.2.1. Zone d'étude.....	110

4.2.2. Mise en place de l'essai.....	110
4.2.2.1. Identification des parcelles d'essai.....	110
4.2.2.2. Description des traitements et du dispositif expérimental	111
4.2.3. Collecte des données.....	120
4.2.4. Analyse des données	120
4.3. Résultats.....	123
4.3.1. Caractéristiques des parcelles et de la gestion des essais	123
4.3.2. Rendement en grain du sorgho des différents traitements	127
4.3.3. Effet de la fertilisation microdose sur le rendement en grain du sorgho en conditions de combinaison avec les amendements organiques	129
4.4. Discussion	137
4.4.1. Rendements en grain du sorgho dus aux traitements.....	137
4.4.2. Augmentation de rendement en grain du sorgho dû à la fertilisation microdose combinée avec les amendements organiques	138
4.4.3. Implication en termes de conseils aux producteurs	145
4.5. Conclusions	146

Chapitre 5	149
Conclusions générales et perspectives	149
5.1. Démarche d'analyse de la variabilité de la fertilisation microdose	150
5.2. Facteurs de variabilité de la réponse à la fertilisation microdose	150
5.3. Effet des amendements organiques sur l'effet de la fertilisation microdose.....	152
5.4. Recommandations pour la vulgarisation de la fertilisation microdose au Burkina Faso.....	153
5.5. Limites et perspectives de l'étude	157
Références bibliographiques	163
Annexes.....	189
Annexe A	189
Annexe B	190
Annexe C	193
Publications et conférences	203
Biographie	205

Liste des figures

Figure 1.1: Principaux facteurs responsables du déficit de rendement du maïs dans les zones et pays d'ASS où cette culture est pratiquée et pour lesquelles les données sont disponibles (Vanlauwe et al., 2014a).	3
Figure 1.2: Trajectoires conceptuelles à partir de la situation actuelle (sol dégradé et faible productivité ; cercle rouge) vers une situation d'intensification durable (sol sain et productivité élevée ; cercle vert), avec les voies priorisées par les différents concepts d'intensification pour atteindre l'objectif d'intensification durable (Vanlauwe et al., 2014a).	8
Figure 1.3: Zones d'études et isohyètes.	18
Figure 2.1: Location of study sites included in the meta-analysis.	37
Figure 2.2: Yield increase following microdose fertilization (FM) relative to the control by crop type, expressed as a percentage (a) and absolute value (b).	43
Figure 2.3: Increase in microdose fertilization (FM) yield compared to the control expressed as a percentage per climatic zone (a) and as a function of the observed rainfall (b).	44
Figure 2.4: Increase in microdose fertilization (FM) yield compared to control per crop type and observed rainfall class.	46
Figure 2.5: Increase in microdose fertilization (FM) yield compared to control based on soil texture, for all data (a) and by climate zone (b).	46
Figure 2.6: Increase in microdose fertilization (FM) yield compared to control based on the type of nutrients supplied..	50

Figure 2.7: Increase in microdose fertilization (FM) yield compared to the control based on P (a) and N (b) application rates per soil texture type.	52
Figure 2.8: Increase in microdose fertilization (FM) yield compared to the control as a function of the associated practice, expressed as a percentage (a) and in absolute value (b).	54
Figure 3.1: Location of study zones, trial plots, and (co-)dominant soils in the three study zones.	67
Figure 3.2: Sorghum grain yield distribution for the Control (Ctr) and FM treatments and yield response to FM (response = Yield FM – Yield Control) for the three provinces.	79
Figure 3.3: Response of sorghum grain yield to FM as a function of yield in control plots in the three provinces.	81
Figure 3.4: Cumulative probability of sorghum grain yield response to FM for the three study provinces. T.	82
Figure 3.5: Boundary lines for sorghum grain yield response to FM (Δ yield) in the Sissili province for (a) soil depth, (b) percentage of soil coarse elements, (c) number of years the plot has been under cultivation, (d) number of days between sowing and first weeding, (e) number of days between sowing and NPK application.	89
Figure 3.6: Boundary lines for sorghum grain yield response to FM (Δ yield) in the Oubritenga province for (a) soil depth, (b) percentage of soil coarse elements, (c) number of years the plot has been under cultivation.	91
Figure 3.7: Boundary lines for sorghum grain yield response to FM (Δ yield) in Zandoma province for (a) soil depth, (b) number of years the plot has been under cultivation, (c) previous crop fertilizer amount,	

(d) Number of days between sowing and NPK application, (e) weed cover. 92

Figure 4.1: Rendement en grain du sorgho des traitements pour chaque province (zone agro-climatique). 128

Figure 4.2: Gain de rendement de sorgho dû à la FM dans la Sissili en fonction (a) du type d'engrais ou d'amendement organique associé, (b) de la teneur en éléments grossiers du sol.....131

Figure 4.3: Gain de rendement de sorgho dû à la FM dans la province de l'Oubritenga en fonction (a) du type d'amendement organique associé, (b) du type de sol, (c) de la couverture des mauvaises herbes.133

Figure 4.4: Gain de rendement du sorgho dû à la FM dans la province du Zandoma en fonction (a) de l'interaction entre le précédent cultural et le type d'amendement organique associé à la FM, (b) de l'interaction entre le nombre d'années de mise en culture de la parcelle et le type d'amendement organique associé à la FM.135

Figure A.1: Funnel plot of the natural logarithm of the effect size ($= \ln(\text{yield ratio})$) as a function of the inverse of the square root of the sample size (n). 189

Figure B. 1: Plant density on FM plots as a function of plant density on control plots, determined at physiological maturity in the three studied provinces. 190

Figure B.2: Average grain weight of sorghum panicles on FM plots as a function of average grain weight of panicles on control plots in the three studied provinces.191

Figure B.3: Average sorghum grain yield for the Control and FM treatments as a function of plot duration of cultivation in the Sissili province.192

Liste des tableaux

Tableau 1.1: Sols dominants et leurs caractéristiques principales en Afrique subsaharienne suivant les zones climatiques (FAO and ITPS, 2015 ; Jones et al., 2015).	5
Tableau 1.2: Caractéristiques agro-climatiques des provinces d'études.	20
Tableau 1.3: Estimation du nombre de chaque type d'animaux, en milliers de têtes par province (MAAH, 2020).	22
Tableau 2.1: Criteria used for inclusion of studies in the meta-analysis.	32
Tableau 2.2: List of documents used in the meta-analysis and their main characteristics.	34
Table 3.1: Soil types in the 3 provinces according to endogenous classification and likely equivalent in World Reference Base (WRB) classification, and their characteristics, qualities and drawbacks according to farmers.	68
Table 3.2: General and management characteristics of experimental sites in each of the three provinces.	77
Table 3.3: Optimal multiple linear regression model to explain sorghum grain yield response to FM (Δ yield) in the Sissili province.	84
Table 3.4: Optimal multiple linear regression model to explain sorghum grain yield response to FM (Δ yield) in the Oubritenga province.	85
Table 3.5: Optimal multiple linear regression model to explain sorghum grain yield response to FM (Δ yield) in the Zandoma province.	87

Tableau 4.1: Traitements de l'essai de stratégies complémentaires et les hypothèses ayant motivé le choix des traitements.	114
Tableau 4.2: Modes d'application des différents traitements de l'essai de stratégie complémentaire.	116
Tableau 4.3: Quantité de nutriments N, P et K (kg ha ⁻¹) apportée par les différents amendements appliqués.	119
Tableau 4.4: Caractéristiques des parcelles et de la gestion des essais.	125
Tableau 4.5: Variables identifiées par le modèle mixte comme affectant l'effet de la FM sur le rendement du sorgho dans chaque province.	129
Tableau 4.6: Proportions de parcelles (%) avec un rapport bénéfice-coût (VCR) < 1 et ≥ 2 pour les traitements avec FM.	136
Tableau C.1: Nombre de parcelles mises en place par province dans le cadre des essais visant à déterminer les facteurs de variabilité (Chap. 3) et à évaluer l'effet du compost ou biochar sur la réponse du sorgho à la FM ('stratégies complémentaires' ; chapitre 4).	198
Tableau C.2: Teneur en nutriments N, P et K (en %) des différents amendements organiques appliqués.	200
Tableau C.3: Teneur en C, N, P assimilable et K assimilable des différents types de sol distingués pour chaque province	201

Sigles et abréviations

AGRA	: Alliance for a Green Revolution in Africa
ASS	: Afrique subsaharienne
Bio	: Biochar
Bioprotechsol	: Projet d'amélioration durable de la fertilité des sols du Burkina Faso par amendement raisonné en matières organiques et biochar
BP	: Burkina Phosphate
BUNASOLS	: Bureau National des Sols du Burkina Faso
CBP	: Co-compost-Burkina Phosphate
CILSS	: Comité inter-États de lutte contre la sécheresse au Sahel
CIMMYT	: International Maize and Wheat Improvement Center
CPAR	: Centre Provincial de l'Agriculture et de la Ruralité
CES/DRS	: Techniques de Conservation des eaux et des Sols/Défense et Restauration des Sols
CV	: Coefficient of Variation
DAP	: Diammonium phosphate
DAS	: Days After Sowing
FAO	: Food and Agriculture Organisation
FM	: Fertilisation microdose
GIFS	: Gestion Intégrée de la Fertilité des Sols
ICP-AES	: Inductively Coupled Plasma-Atomic Emission Spectrometry
ICRISAT	: International Crops Research Institute for the Semi-Arid Tropics

INERA	: Institut de l'Environnement et de Recherches Agricoles
ITPS	: Intergovernmental Technical Panel on Soils
JAS	: Jour Après Semis
K	: Potassium
MAAH	: Ministère de l'Agriculture et des Aménagements Hydrauliques
Microferti	: Projet d'intensification agricole durable du mil, du sorgho et du maïs par fertilisation microdose
N	: Nitrogen, Azote
NPK	: engrais de type N-P-K
OCP	: Office Chérifien des Phosphates
OM	: Organic Amendment
ONG	: Organisation Non Gouvernementale
P	: Phosphorus, phosphore
PANA	: Programme d'Action National d'Adaptation à la variabilité et aux changements climatique
PIB	: Produit intérieur brut
PNDES	: Plan National de Développement Économique et Social
SD	: Standard deviation
SSA	: Sub-Saharan Africa
UCL	: Université catholique de Louvain
UNB	: Université de Nazi Boni
USDA	: United States Department of Agriculture
VCR	: Value-Cost Ratio
VIF	: Variance Inflation Factor
WRB	: World Reference Base

Chapitre 1

Introduction Générale

1.1. Contexte de la production agricole en Afrique subsaharienne

L'agriculture occupe une part importante de la main d'œuvre en Afrique avec plus de 50% de la population qui y travaille. Ce secteur a contribué à environ 50% du PIB en Afrique subsaharienne (ASS) pour l'année 2015 (AGRA, 2017). Dans cette région, l'agriculture est essentiellement pluviale (80% des terres agricoles), et pratiquée par de petits producteurs avec un faible niveau d'intensification. En effet, comparé à d'autres régions du monde, les producteurs en ASS ont des difficultés d'accès aux équipements de mécanisation et d'irrigation, aux intrants (engrais et variétés améliorées) et à des dispositifs d'accompagnement (FAO, 2020). Ainsi, le niveau de productivité demeure très bas (Van der Velde et al., 2013; AGRA, 2017) et ne permet pas de satisfaire aux besoins alimentaires des populations. Selon la FAO (2021), sur les 768 millions de personnes sous-alimentées dans le monde en 2020, 37% étaient localisées en Afrique, dont environ 35% en zone subsaharienne.

Malgré la mise au point de variétés à fort potentiel de rendement dans de nombreux pays, les rendements obtenus par les producteurs restent toujours largement en dessous des potentiels de rendement (Van Ittersum et al., 2016; Kuyah et al., 2021). Ces faibles niveaux de rendement s'expliquent principalement par l'effet de contraintes hydriques, de déficiences en nutriments et de pratiques agronomiques inadaptées (Mueller et al., 2012 ; Vanlauwe et al., 2014a). A titre d'illustration, la figure 1.1 indique les principaux facteurs responsables du déficit de rendement du maïs en ASS.

Les contraintes hydriques résultent du manque de précipitations, mais aussi de la forte variabilité spatio-temporelle de la pluviométrie, surtout en zones arides et semi-arides (Kotir, 2011 ; Sultan and Gaetani, 2016). La variabilité climatique se traduit le plus souvent par des poches de sécheresse et peut entraîner des pertes importantes de rendement d'une année à l'autre et à différents endroits d'un territoire pour une même année (Akponikpè et al., 2011). En ASS, les événements les plus marquants liés à la variabilité temporelle de pluviométrie sont les sécheresses des années 1970 et 1980 qui ont entraîné de grandes famines en zone sahélienne (Le Barbe and Tapsoba, 2002).

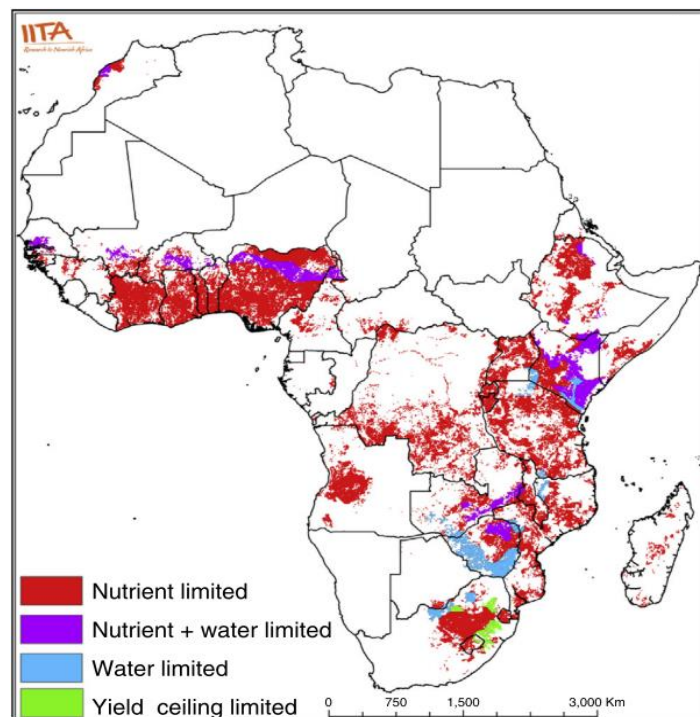


Figure 1.1: Principaux facteurs responsables du déficit de rendement du maïs dans les zones et pays d'ASS où cette culture est pratiquée et pour lesquelles les données sont disponibles (Vanlauwe et al., 2014a).

Les déficiences en nutriments résultent en partie de la faible fertilité inhérente des sols (Bationo et al., 2007; Zingore et al., 2008). La fertilité inhérente traduit la capacité du sol à permettre la production de biomasse par la végétation et/ou les cultures. En dehors de l'influence anthropique, cette qualité du sol résulte en grande partie des caractéristiques que sont la nature du matériau parental, la texture, la teneur en carbone organique, la capacité d'échange cationique, la profondeur et le pH du sol en interaction avec le climat (FAO and ITPS, 2015, Magdoff and Vans Es, 2021). Les sols dominants en zone subsaharienne et leurs caractéristiques ont été décrits par Jones et al. (2015) et FAO and ITPS (2015). Ces sols sont en général considérés comme ayant une faible capacité productive du fait de leurs caractéristiques intrinsèques (Tableau 1.1).

En plus de la faible fertilité naturelle des sols, le déficit de rendement (*yield gap*) des cultures est accentué par la dégradation des sols résultant de pratiques agronomiques inadaptées. En effet, l'agriculture en zone subsaharienne est réalisée en grande partie avec peu d'apports d'engrais ou d'amendements organiques (Samaké et al., 2005; Cobo et al., 2010). Cela se traduit par des déplétions importantes de nutriments à travers l'exportation des récoltes. Les pertes de nutriments N, P et K en Afrique sont estimées entre 40 et 50 kg/ha/an (Lal et al., 2015). En ASS, ces pertes ont été estimées en moyenne à 22 kg de N, 2,5 kg de P et 15 kg de K par hectare et par an, avec une grande variabilité de bilans en nutriments entre les pays (Bationo et al., 1998). Ainsi, l'augmentation de la production observée dans certains pays pour certaines cultures repose plus sur une augmentation des superficies cultivées, grâce à de nouvelles défriches, que sur une intensification de la production (Kuyah

et al., 2021). Cependant, avec la croissance de la population, l'augmentation des espaces cultivés n'est pas soutenable et les pratiques

Tableau 1.1: Sols dominants et leurs caractéristiques principales en Afrique subsaharienne suivant les zones climatiques (FAO and ITPS, 2015 ; Jones et al., 2015).

Zone climatique	Groupe de sols de référence dominant	Caractéristiques principales
Aride à semi-aride (500-1000 mm)	Arenosols	- Faible capacité de rétention en eau - Faible teneur en nutriments - Susceptible à l'érosion éolienne
	Plinthosols	- Faible profondeur (présence de cuirasse ferrugineuse) - Rétention du phosphore
	Lixisols	- Faible teneur en nutriments et en matière organique - Faible capacité de rétention en nutriments - Susceptible à l'érosion hydrique et éolienne
	Cambisols	- Bonne capacité de rétention en nutriments, mais faible teneur en nutriments pour les sols fortement altérés
Sub-humide (1000-1500 mm)	Cambisols	- Bonne capacité de rétention en nutriments, mais faible teneur en nutriments pour les sols fortement altérés
Humide (>1500 mm)	Ferralsols, Acrisols	- Sols fortement altérés avec des teneurs élevées en oxyde de fer et d'aluminium (acide) - Faible teneur en nutriments - Faible capacité de rétention en eau et en nutriments - Susceptible à l'érosion hydrique

traditionnelles de gestion de la fertilité par le biais de longues jachères sont aujourd'hui difficilement praticables (Serpantié and Ouattara, 2001).

Face aux faibles niveaux de productivité et à la dégradation des terres, un ensemble de technologies agronomiques ont été développées et promues avec plus ou moins de succès en ASS (Chikowo et al., 2010; Tonitto et Ricker-Gilbert, 2016; Aune et al., 2017; Kuyah et al., 2021). Suivant le contexte et les objectifs spécifiques recherchés, ces technologies se résument en des combinaisons ou non des pratiques suivantes : (i) : l'apport d'engrais minéraux et/ou d'amendements organiques ; (ii) le travail réduit du sol ou *conservation tillage* ; (iii) l'association céréales-légumineuses ; (iv) l'association de légumineuses à double objectif, appelée « *doubled-up legume technology* » (v) l'agroforesterie ; (vi) des techniques de conservation des eaux et des sols, de défense et restauration des sols (CES/DRS).

Le concept de Gestion Intégrée de la Fertilité des Sols (GIFS) a été l'une des approches les plus vulgarisées en ASS, visant la combinaison de certaines de ces pratiques (Vanlauwe et al., 2015). Le concept de GIFS est défini comme une combinaison adaptée au contexte local de pratiques de gestion de la fertilité des sols, incluant l'utilisation d'engrais minéraux, de ressources organiques et de variétés améliorées, afin de maximiser l'efficacité agronomique des engrais, des ressources organiques et la productivité des cultures (Sanginga and Woomer, 2009). D'autres concepts s'articulant autour des pratiques agronomiques ci-dessus mentionnées sont aussi vulgarisés avec pour objectif commun d'améliorer la productivité et d'assurer la durabilité des systèmes agricoles (Corbeels et al., 2014 ; Garrity et al., 2010 ;

Khan et al., 2014). Il s'agit par exemple de : (i) l'agriculture de conservation ou *conservation agriculture* ; (ii) l'agriculture doublement verte ou *evergreen agriculture*; et (iii) l'association répulsion-attraction ou "*push-pull*" *intercropping*. La figure 1.2 provenant de Vanlauwe et al. (2014a) résume bien les objectifs prioritaires de chaque concept en termes de compromis entre objectifs de productivité et d'amélioration de la fertilité du sol. En cherchant à maximiser l'efficacité agronomique des amendements, le concept de GIFS priorise une augmentation à court terme de la productivité, puis une amélioration progressive de la fertilité du sol. Le concept de *evergreen agriculture* consiste en une intégration d'espèces d'arbres appropriés (le plus souvent des légumineuses) aux cultures. Cette approche priorise d'abord une amélioration de la fertilité du sol, puis une augmentation graduelle de la productivité. Les concepts de *conservation agriculture* et de "*push-pull*" *intercropping* visent un certain compromis entre ces deux extrêmes. L'agriculture de conservation consiste à combiner une réduction du travail du sol avec une couverture permanente du sol par un *mulch* végétal vivant ou mort (résidus de culture) et une rotation et/ou association des cultures avec des légumineuses. Développé initialement comme une stratégie de contrôle de ravageurs, le concept de "*push-pull*" est aussi apparu comme une technique qui améliore la fertilité du sol. Dans le cadre de cette approche, une espèce de plante qui repousse les ravageurs et améliore la fertilité du sol est semée en association avec la culture (*Desmodium sp.*) ; et une espèce de plante qui attire les ravageurs est semée en bordure de la culture.

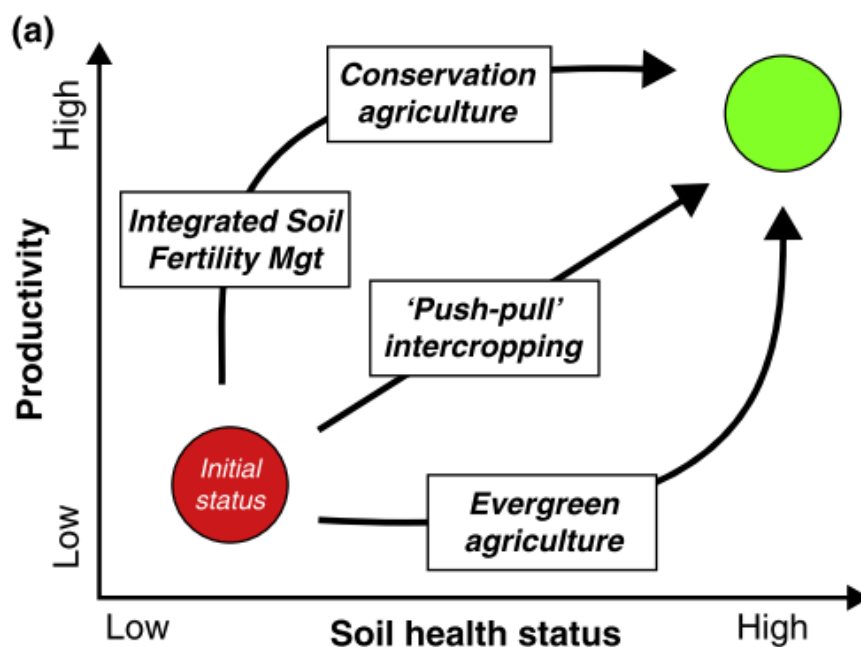


Figure 1.2: Trajectoires conceptuelles à partir de la situation actuelle (sol dégradé et faible productivité ; cercle rouge) vers une situation d'intensification durable (sol sain et productivité élevée ; cercle vert), avec les voies prioritaires par les différents concepts d'intensification pour atteindre l'objectif d'intensification durable (Vanlauwe et al., 2014a).

1.2. Problématique de la variabilité de la réponse des technologies agricoles en Afrique subsaharienne : cas de la fertilisation microdose

Dans un contexte où la déficience en nutriments constitue l'une des principales contraintes à la production (Figure 1.1), l'apport d'engrais est indispensable pour booster la production. En effet, l'efficacité agronomique d'utilisation des nutriments par les cultures est meilleure pour les engrais minéraux que pour les autres sources d'apport de nutriments (Chivenge et al., 2011 ; Tovihoudji et al., 2017). En GIFS, l'engrais constitue le point d'entrée pour accroître à court terme les

rendements et ainsi disposer des quantités de résidus de culture nécessaires pour produire les amendements organiques (Sanginga and Woome, 2009). La nécessité d'inclure les engrais dans les approches d'intensification durable est rappelée par Vanlauwe et al. (2014b) qui soutiennent la prise en compte de l'apport d'engrais comme 4^e pilier de l'agriculture de conservation. Ces auteurs montrent que l'engrais est indispensable, du moins dans un premier temps, pour obtenir le niveau de biomasse nécessaire au démarrage de l'agriculture de conservation auprès des petits producteurs en ASS.

Malgré cette reconnaissance de l'importance des engrais et les efforts déployés pour sa promotion, l'application d'engrais demeure faible en ASS (Thigpen, 2006 ; Tonitto et Ricker-Gilbert, 2016 ; Koussoubé and Nauges, 2017). La quantité moyenne d'engrais appliquée est de 20,7 kg ha⁻¹ en Afrique de l'Est et de 13,9 kg ha⁻¹ en Afrique de l'Ouest (Oxford Business Group and OCP, 2021). Ces apports d'engrais sont surtout observés dans les grandes fermes commerciales et sur certaines cultures majeures d'exportation (coton, café, sucre, etc.) (Sanginga and Woome, 2009; Sheahan and Barrett, 2017), mais très peu chez les petits producteurs qui sont à la base de la production alimentaire destinée aux populations (Chianu et al., 2012; Van der Velde et al., 2013; Kuyah et al., 2021). Ce faible niveau d'application des fertilisants s'explique par les coûts relativement élevés des engrais, la disponibilité limitée de ces intrants sur les marchés locaux, le packaging (p.ex., sac de 50 kg) souvent inadapté à la capacité financière des petits producteurs et le risque de non-retour sur investissement de l'engrais lié à la forte dépendance de la production aux aléas du climat (Abdoulaye and Sanders, 2005; Bumb et al., 2011; Chianu et al., 2012).

Ainsi, les doses classiques d'engrais recommandées par les institutions de recherche sont difficilement à la portée des petits exploitants (Twomlow et al., 2010).

Compte tenu de ce qui précède, il est apparu que pour ces petits producteurs avec peu de ressources, les apports d'engrais doivent viser la maximisation du gain de rendement et de revenu par unité d'engrais et non une maximisation du rendement par unité de surface qui nécessite des doses importantes d'engrais (Sanginga and Woomer, 2009). La technique de la fertilisation microdose (FM) a donc été proposée comme une approche pour impulser l'utilisation des engrais auprès des petits producteurs. Cette technique, initiée par l'ICRISAT vers la fin des années 1990, consiste à placer de façon localisée de petites quantités d'engrais minéraux (2 à 6 g) dans les poquets au moment du semis ou environ 10 à 15 jours après la levée à côté des plantules (Twomlow et al., 2006 ; Tabo et al., 2007; Hayashi et al., 2008). Elle est considérée comme une étape dans le processus d'intensification agricole permettant aux petits producteurs d'augmenter leur productivité et d'évoluer vers des pratiques de gestion intégrée de la fertilité des sols (Aune and Bationo 2008). Les engrais les plus utilisés en FM en Afrique de l'Ouest sont le DAP (18-46-00), le NPK (15-15-15 or 14-23-14) et l'urée (46-00-00). Ainsi, suivant le type d'engrais utilisé (NPK, DAP, avec ou sans urée), le type de culture et la densité de semis, la FM apporte 6-46 kg de N ha⁻¹, 2-12 kg de P ha⁻¹, et 0-14 kg de K ha⁻¹. Elle permet de réduire les apports d'engrais de 30% à 50% par rapport aux doses recommandées (Aune et al., 2007) et d'ajuster les quantités d'engrais appliquées à la densité de semis

contrairement à l'application à la volée (Muehlig-Versen et al., 2003; Bielders et Gérard, 2015).

Plusieurs travaux ont montré que la FM permet d'augmenter de façon importante les rendements des cultures céréalières comparés aux pratiques courantes des producteurs sans apports d'engrais, et d'avoir des rendements aussi importants, voire supérieurs à ceux obtenus avec les doses classiques de fertilisation recommandées par la recherche (Okebalama et al., 2017 ; Demisie, 2018). Des augmentations de rendement de l'ordre de 44-120% par rapport à la pratique sans engrais ont par exemple été rapportées par Tabo et al. (2007). Du fait de ces performances, la FM est activement vulgarisée dans de nombreux pays subsahariens (Twomlow et al., 2010 ; Tabo et al., 2011 ; AGRA, 2014).

La contrainte souvent évoquée par les producteurs dans la mise en œuvre de la FM est la demande de main d'œuvre supplémentaire pour l'application localisée des engrais. Face à cela, des travaux sur la petite mécanisation de la FM sont en cours dans certains pays. Cependant, en plus de la contrainte de main d'œuvre, il ressort de plus en plus des initiatives de vulgarisation que les niveaux de réponse des cultures à la FM peuvent être très variables entre exploitations et même entre parcelles d'une même exploitation (Twomlow et al., 2010; Tabo et al., 2011 ; Camara et al., 2013). Dans une étude au Niger, Bielders et Gérard (2015) ont rapporté que 34% des 276 parcelles qu'ils ont suivies se sont retrouvées en dessous du seuil de rentabilité. Au Bénin, sur 51 parcelles analysées, Tovihoudji et al. (2019) ont trouvé que, suivant les scénarios de prix de l'engrais et du maïs, 6% à 86% des réponses observées sur les parcelles ne permettent pas de rentabiliser l'apport de l'engrais.

La question de la variabilité n'est pas spécifique à la FM. Elle a été évoquée pour les apports d'engrais en général (Chikowo et al., 2010 ; Kihara et al., 2016; Njoroge et al., 2017a) et plus globalement pour d'autres technologies d'intensification durable en ASS (Fermont et al., 2009 ; Falconnier et al., 2016 ; Vanlauwe et al., 2016). La variabilité peut être liée au climat et à l'hétérogénéité de l'environnement biophysique des exploitations, des systèmes de cultures et des pratiques culturales.

En zone aride de l'ASS, la forte variabilité spatio-temporelle de la pluviométrie peut constituer le principal facteur de la variabilité de la réponse des cultures aux engrais (Akponikpè et al., 2011 ; Tabo et al., 2011). Une fois la contrainte de manque d'eau levée, les déficiences en certains nutriments peuvent alors constituer les causes des différences de réponse. Le phosphore est identifié comme le nutriment limitant le plus souvent la production en zone de faible pluviométrie (zone sahélienne). Ensuite, l'azote tend à devenir le plus limitant lorsqu'on évolue vers les zones les plus pluvieuses (Buerkert et al., 2002; Buerkert and Schlecht, 2013). Néanmoins, l'apport de ces nutriments majeurs (N et P) se révèle dans certains cas insuffisant pour obtenir de bonnes réponses du fait de multiples déficiences en nutriments secondaires et/ou micronutriments (Kihara et al., 2016 ; Njoroge et al., 2017b). En outre, à l'intérieur d'une même zone agro-climatique ou à une échelle plus réduite telle que la toposéquence au sein d'un même territoire, les différences de type de sol ou de leurs caractéristiques physico-chimiques (profondeur, texture, compaction, acidité, toxicité, etc.) sont d'autres facteurs de variabilité de la réponse (Rockström et al., 1999; Voortman et al., 2004; Kissou et al., 2014).

Cette variabilité spatiale liée aux différences de caractéristiques des sols est accentuée par les dynamiques à l'intérieur des systèmes de cultures. En effet, des gradients de fertilité des parcelles sont souvent rapportés en fonction de la distance des parcelles à la concession du producteur. Les parcelles les proches des concessions sont en général plus fertiles, car elles bénéficient d'apports réguliers et plus importants de matières organiques comparés aux parcelles les plus éloignées (Prudencio, 1993; Zingore et al., 2007a). Par ailleurs, il a été montré que l'importance de ce gradient est aussi fonction de la dotation en ressources des exploitations. Ainsi, le gradient de fertilité est moins accentué chez les producteurs ayant plus de ressources (amendements organiques et capacité de transport) que chez les producteurs les moins nantis pour qui la faible disponibilité de la matière organique et/ou des moyens de transport limitent l'amendement des parcelles les plus éloignées (Tittonell et al., 2005; Zingore et al., 2007b; Nyamangara et al., 2011). Outre les facteurs liés à la fertilité des parcelles, l'effet des attaques de pestes ou de maladies peut être très dommageable aux rendements des parcelles (Khan et al., 2010). Enfin, la gestion des parcelles en termes de respect des opérations culturales (sarclages, désherbage, apports des fertilisants, etc.) est déterminante dans la réponse à la fertilisation (Fermont et al., 2009 ; Kamanga et al., 2014 ; Chipomho et al., 2020).

La variabilité constitue un véritable défi à la vulgarisation des technologies agricoles en ASS. En effet, le schéma classique de diffusion qui se base sur des performances moyennes des technologies ignore la situation de nombreux producteurs et conduit à de faibles niveaux d'adoption, notamment de la part des producteurs pour lesquels les gains en rendement, ou la rentabilité économique, se retrouvent en

dessous des moyennes espérées (Vanlauwe et al., 2016). Dans le cas spécifique de la FM, cette variabilité pourrait conduire à un rejet par une frange de producteurs désabusés qui se situeraient en dehors de la gamme de rentabilité économique de la technique. Cela pourrait conduire à une méfiance généralisée des producteurs vis-à-vis de la FM et freiner son adoption et celle de la fertilisation en général.

Il est donc essentiel de développer, conjointement avec les producteurs, des mesures pour accompagner la diffusion de la FM qui constitue un point d'entrée des petits producteurs vers des systèmes plus productifs et durables. Ces mesures d'accompagnement doivent impliquer non seulement la détermination des conditions biophysiques et de gestion des cultures où de bonnes réponses des cultures à la FM peuvent être observées, mais aussi l'identification de pratiques agronomiques qui, combinées avec la FM, permettent d'améliorer l'effet de ce dernier sur l'augmentation des rendements. Ainsi, une approche d'analyse de la variabilité qui prend en compte les pratiques de GIFS le plus souvent associées à la FM est nécessaire afin d'identifier les conditions de bonne réponse de la FM. Les pratiques qui ont été les plus explorées en combinaison avec la FM sont les techniques de conservation/collecte des eaux dans les zones de faibles pluviométries (Ibrahim, et al., 2015b; Palé et al., 2009), ainsi que les associations avec des amendements organiques ou calco-magnésiens (Ibrahim et al., 2015a; Kisinyo et al., 2015 ; Somda et al., 2017 ; Tovihoudji et al., 2017). Outre le compost et le fumier qui sont des amendements organiques classiques bien connus par les producteurs en ASS, le biochar (amendement organique issu de la combustion incomplète de matériaux végétaux encore peu valorisés par les producteurs) est de plus en plus testé en combinaison

avec les engrais pour pallier la faible disponibilité des amendements organiques classiques (Graef et al., 2018 ; Kamau et al., 2019 ; Cissé et al., 2021).

1.3. Questions et objectifs de recherche

1.3.1. Questions de recherche

Les actions de vulgarisation à grande échelle de la FM en ASS ont été effectuées en faisant implicitement l'hypothèse que la technique était applicable par tous les petits producteurs, quel que soit leur environnement. Aucune de ces actions ne s'est donc attachée à développer des domaines de recommandations prenant en compte l'hétérogénéité des contextes biophysiques, parfois très locaux, et la diversité des situations des exploitations agricoles. Un changement de paradigme est par conséquent nécessaire en matière de vulgarisation de la FM. Pour accompagner ce changement, ce projet de thèse vise à répondre à deux grandes questions scientifiques :

- Quels sont les domaines, en termes de caractéristiques des parcelles, de pratiques agronomiques et de conditions environnementales des exploitations, dans les lesquelles la réponse et la rentabilité économique de la FM telle que pratiquée actuellement sont satisfaisantes ?
- Dans quelle mesure est-il possible d'élargir le champ d'application de la FM, en la couplant à des pratiques agronomiques qui permettraient d'augmenter sa réponse et sa rentabilité économique ?

1.3.2. Objectifs de recherche

L'objectif global de cette thèse est d'accompagner la dynamique de vulgarisation de la FM en permettant de mieux cibler les domaines biophysiques et de pratiques agronomiques où les performances de la FM en termes de gain de rendement et de rentabilité économique sont acceptables. Pour atteindre cet objectif, notre démarche s'est articulée autour de trois objectifs spécifiques :

- Réaliser une méta-analyse des données scientifiques publiées sur la FM en Afrique subsaharienne afin d'identifier les grandes tendances de variation de la réponse des cultures céréalières à la FM et déterminer les principaux facteurs associés à cette variabilité (**chapitre 2**).
- Identifier, dans le contexte du Burkina Faso, les facteurs déterminant la réponse du sorgho à la FM dans trois zones agro-climatiques et établir des recommandations en termes de domaines biophysiques et de pratiques agronomiques pour lesquels les meilleures réponses peuvent être observées (**chapitre 3**).
- Rechercher les conditions des petites exploitations agricoles du Burkina Faso où il est possible d'avoir des effets synergiques entre la FM et les pratiques d'amendements organiques que sont les apports de compost et de biochar (**chapitre 4**).

1.4. Description de la zone d'étude.

Les essais agronomiques dans cette étude ont été conduits au Burkina Faso sur des parcelles de petits exploitants agricoles. Le Burkina Faso est un pays d'Afrique Sub-saharienne ($12^{\circ}14' 22.20''$ N, $-1^{\circ} 33' 30.27''$ O) dont la superficie est de 274 200 km² (Figure 1.3). Le pays compte une population de 20 millions d'habitants. Son territoire comprend trois principales zones climatiques : une zone sahélienne au nord (300 - 600 mm de pluviométrie annuelle), une zone soudano-sahélienne au centre (600 – 900 mm) et une zone soudanienne au sud (900 - 1200 mm) (PANA, 2007). Le secteur primaire dominé par l'agriculture représente 25,1% du PIB et emploie près de 80% de la population active (PNDES, 2021). Les principales cultures de rente sont, par ordre d'importance, le coton, l'arachide, le sésame et le soja. En termes de céréales, les principales cultures sont le sorgho, le maïs, le mil et le riz. Sur environ 6 450 000 hectares emblavés en 2020, les cultures céréalières occupaient 64% de la superficie (dont 27 % pour le sorgho, 17 % pour le maïs, 17% pour le mil et 3 % de riz) (MAAH, 2020).

L'agriculture est essentiellement pluviale et caractérisée par une faible utilisation d'engrais (43% des superficies cultivées en 2020). Les apports d'engrais sont orientés principalement sur le coton et le maïs (~ 150 kg ha⁻¹ de NPK + urée) et secondairement vers le sorgho (~ 70 kg ha⁻¹ de NPK + urée) (MAAH, 2020). La FM a été largement vulgarisée au Burkina Faso par de nombreux projets sur les principales cultures que sont le sorgho, le maïs et le mil. La plus importante vulgarisation a été réalisée par le projet AGRA-microdose de 2009 à

2012 dans 8 provinces réparties dans les différentes zones agro-climatiques du pays.

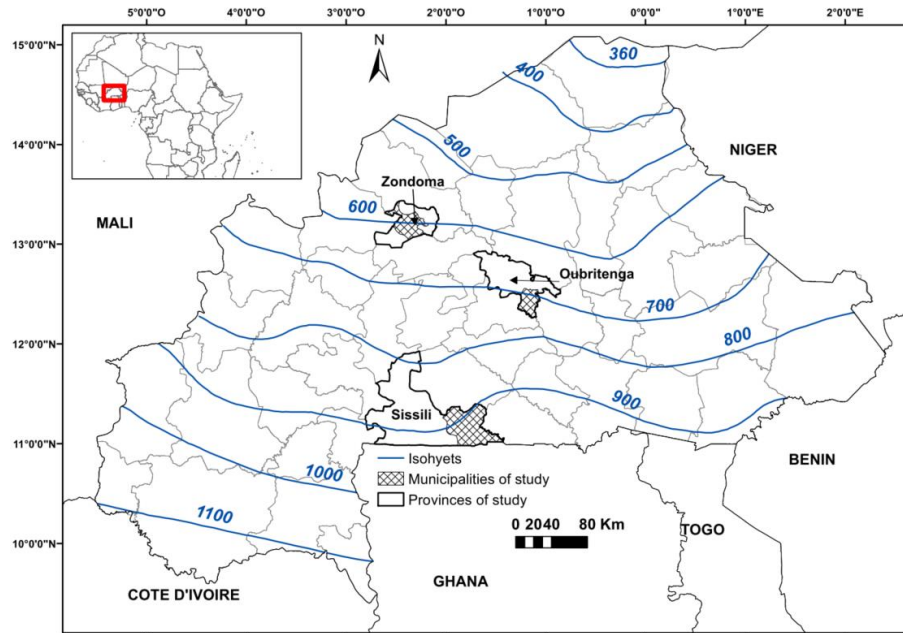


Figure 1.3: Zones d'études et isohyètes.

Au terme du projet AGRA-microdose, 45 000 producteurs ont adopté la FM sur 39% des champs des sites du projet (AGRA, 2014). Par ailleurs, il a été relevé un engouement des petits producteurs pour l'utilisation de la FM, et des fiches techniques ont été élaborées par la recherche pour servir de support de promotion de cette technologie (Taonda et al., 2015).

L'importance des principales cultures et les systèmes de cultures diffèrent suivant le gradient climatique sud-nord du pays. Les essais ont donc été menés dans trois provinces suivant ce gradient. Il s'agit de la province de la Sissili au Centre Ouest, de l'Oubritenga au Centre, et du Zandoma au Nord. La pluviométrie dans les trois provinces suit une distribution unimodale avec une saison de pluie de mai à octobre. Dans

chaque province, une commune a été choisie selon la disponibilité d'organisations paysannes fortement impliquées dans la promotion de la FM. Il s'agit de la commune de Bieha (11° 03' 26" N, 1°49' 20" O), de Nagréongo (12° 28' 58" N, 1° 11' 36"O), et de Gourcy (13° 13' 00" N, 2° 21' 00" O) respectivement dans la province de la Sissili, de l'Oubritenga et du Zandoma (Figure 1.3). Dans chaque commune, trois villages ont été choisis pour couvrir une diversité de contexte.

Le Tableau 1.2 indique les principales cultures et les types de sols dominants dans les zones d'études. Du fait de la meilleure pluviométrie qui y est observée, la province de la Sissili est une zone de culture de maïs et de coton (Table 1.2). Ces cultures bénéficient en général d'apports relativement importants d'engrais (100 à 150 kg ha⁻¹ de NPK + urée) comparativement au sorgho dont la culture se fait sans engrais dans cette province (MAAH, 2020). En effet, la culture du coton est organisée par une société cotonnière qui met à la disposition des producteurs les engrais pour la culture du coton et se charge de la collecte de la production cotonnière. Une partie de cet engrais est utilisée par les producteurs pour la culture du maïs. Cependant, avec les fluctuations des cours du coton, on observe une diminution des superficies de coton au profit du sésame dont la vente permet l'achat d'engrais pour la culture du maïs. Les principales successions culturales sont : maïs-sorgho-légumineuse ou sésame, et coton-maïs-sorgho ou sésame (source : enquêtes de terrain dans les villages de notre étude).

Tableau 1.2: Caractéristiques agro-climatiques des provinces d'études.

	Sissili (Bieha)	Oubritenga (Nagréongo)	Zandoma (Gourcy)
Zone agro-climatique	Soudanienne	Soudano-Sahélienne	Sahélienne
Pluviométrie (mm/an)	800 - 1000	600 - 800	500 - 600
Sols dominants dans les communes d'étude	- Sol ferrugineux tropical lessivé induré (68%) - Sol ferrugineux tropical lessivé à taches et concrétions (19%) - Sol hydromorphe peu humifère à pseudogley (8%) - Lithosol (4%)	- Sol ferrugineux tropical lessivé induré (58%) - Sol brun eutrophe tropical (11%) - Sol hydromorphe peu humifère à pseudogley (10%) - Sol ferrugineux tropical lessivé à taches et concrétions (10%) - Lithosol (3%)	- Sol ferrugineux tropical lessivé Induré (64%) - Sol ferrugineux tropical lessivé à taches et concrétions (22%) - Lithosol (5%) - Sol brun subaride modal (5%) - Sol brun eutrophe tropical (3%) - Sol hydromorphe peu humifère à pseudogley (1%)
Principale culture (par ordre d'importance)	Maïs, sorgho, sésame, coton	Sorgho, mil, sésame, arachide, niébé	Sorgho, mil, arachide, niébé

8% de la surface de la commune de Nagréongo (province d'Oubritenga) est couverte par des plans d'eau (le barrage de Ziga essentiellement). Les pourcentages des sols ont été calculés sur la base de la cartographie morpho-pédologique (échelle 1/100000) du Bureau National des Sols du Burkina Faso, en considérant ici que les sols dominants ou co-dominants occupent toute l'unité cartographique de sol considérée. Les possibles équivalences des sols selon la classification WRB 2014 sont les suivants : Sol ferrugineux tropical lessivé induré = Epipetric Plinthosols ; Sol ferrugineux tropical lessivé à taches et concrétions = Ferric Lixisols ; Sol hydromorphe peu humifère à pseudogley = Gleysols; Lithosol = Epipetric Plinthosols ou Leptosols ; Sol brun subaride modal = Haplic Cambisols ; Sol brun eutrophe tropical = Vertic Cambisols.

Dans l'Oubritenga, les parcelles sont généralement cultivées sans engrais (74 % des superficies cultivées sans engrais en 2020). Cependant, avec la promotion active de la microdose dans cette province, on constate des apports d'engrais (NPK) sur les parcelles de certains producteurs à des doses moyennes d'environ 90 kg ha⁻¹ (MAAH, 2020). Dans le Zandoma, en plus de la faible pluviométrie, les sols sont plus dégradés du fait de la forte pression démographique. Ainsi, les producteurs dans leurs pratiques courantes apportent systématiquement de petites quantités d'engrais NPK sur leurs principales parcelles. 72% des superficies cultivées en 2020 ont bénéficié d'apport d'engrais dans cette province (MAAH, 2020). Ces apports sont orientés principalement sur le sorgho qui constitue la base de l'alimentation des familles. En moyenne, ces doses sont de 72 ± 29 kg ha⁻¹ pour les parcelles bénéficiant seulement de fertilisation minérale et 62 ± 21 kg ha⁻¹ pour celles bénéficiant aussi d'un apport de matières organiques (source : enquêtes de terrain dans les villages de notre étude). La principale succession culturale dans l'Oubritenga et le Zandoma est une culture continue de sorgho, parfois interrompue par une légumineuse ou du mil. L'intervention de la légumineuse est plus fréquente dans le Zandoma que dans l'Oubritenga (source : enquête de terrain dans les villages de notre étude).

Les exploitations agricoles dans les trois provinces sont généralement de type mixte agriculture-élevage. Les animaux d'élevage résultent le plus souvent de l'épargne agricole et sont constitués de bovins, d'asins, de caprins, d'ovins et de volailles. Leur importance dépend de la capacité d'épargne de l'exploitation et de son orientation en agriculture ou en élevage. Dans le cheptel, on peut distinguer les animaux

d'élevage et les animaux de traits. Les animaux de traits sont des bovins dans la province de la Sissili et peuvent être des bovins ou asins dans l'Oubritenga et le Zandoma. Ces animaux sont attelés pour la réalisation des activités de travail du sol et/ou de transport dans les exploitations. Les nombres estimés de chaque type d'animaux pour chaque province sont indiqués dans le tableau 1.3 (MAAH, 2020).

Tableau 1.3: Estimation du nombre de chaque type d'animaux, en milliers de têtes par province (MAAH, 2020).

	Sissili	Oubritenga	Zandoma
Bovins	203	121	39
Asins	42	54	16
Caprins	427	253	79
Ovins	242	228	64
Poulets	1097	633	479
Pintades	570	78	17

1.5. Plan de la thèse

La thèse est organisée en 5 chapitres.

Le chapitre 1 présente le contexte général de la fertilité des sols en ASS, la problématique de la variabilité de la réponse des cultures à la fertilisation microdose et la description de la zone d'étude.

Les chapitres 2, 3 et 4 s'articulent autour de chaque objectif spécifique de la thèse. Ils sont présentés sous forme d'article, comprenant : introduction, matériels et méthodes, résultats, discussion et conclusion. Le chapitre 2 traite de la métaanalyse (1^{er} objectif spécifique), et les chapitres 3 et 4 des essais agronomiques. Les essais agronomiques se distinguent en essais visant à déterminer les facteurs de la variabilité de la réponse du sorgho à la FM (chapitre 3, 2^e objectif spécifique), et en

essai de recherche de stratégies complémentaires à la FM (chapitre 4, 3^e objectif spécifique). Ces deux derniers chapitres ont en commun certains matériels et méthodes. Ainsi, les matériels et méthodes communs déjà présentés dans le chapitre 3 ne seront plus exposés dans le chapitre 4. Le chapitre 5 constitue une conclusion générale qui synthétise les différents résultats de la thèse et expose les perspectives qui peuvent découler de ces résultats. Les chapitres 2 et 3, respectivement publié et soumis pour review, sont rédigés en anglais.

Chapitre 2

Factors driving cereal response to fertilizer microdosing in sub-saharan Africa: A meta-analysis.

Adapted from:

Ouedraogo, Y., Taonda, JB. S., Sermé, I., Tychon, B., & Biielders, C. L. (2020). Factors driving cereal response to fertilizer microdosing in sub-saharan Africa: A meta-analysis. *Agronomy Journal*, July 2019, 1–14. <https://doi.org/10.1002/agj2.20229>

Abstract

Fertilizer microdosing (FM) is being promoted in sub-Saharan Africa (SSA) to boost crop productivity on smallholder farms. However, yield response variability is a barrier to adoption. We conducted a meta-analysis to analyze the variability in cereal crop yield response to FM and to determine the main factors associated with this variability. Thirty publications pertaining to millet (*Pennisetum glaucum* (L.) R. Br.), sorghum (*Sorghum bicolor* L. Moench) or maize (*Zea mays* L.) were assessed. Factors analyzed were crop type, rainfall, soil texture, type and rate of fertilizer, and complementary practices. On average, FM improved millet, sorghum and maize crop yields by 68%. Yield response tended to increase with increasing rainfall and the largest yield gains were observed in medium-textured soils (81%), as compared to light (61%) and heavy-textured soils (30%). The combined application of N and P performed better than either element alone. Crop response tended to increase with increasing rates of N. In the case of P, this was true only on light textured-soils. On medium-textured soils, the response appeared independent of the rate of P. There was a synergetic effect of water conservation measures on the performance of FM, while combining FM with organic amendments decreased its performance. Results highlighted major trends in cereal crop response to FM that could be used to prioritize target areas. However, these may require additional, site-specific field experiments, especially for factors for which little data is currently available.

Keywords: Fertilizer microdosing, fertilizer placement, meta-analysis, variability in crop response, sub-saharan Africa.

2.1. Introduction

In sub-Saharan Africa (SSA), cereals are mostly grown under rainfed conditions by smallholder farmers with limited resources. Crop yields are low due to low inherent soil fertility, limited availability of organic amendments and high cost of mineral fertilizers (Yanggen et al., 1998; Van der Velde et al., 2013). In particular, fertilizer application rates remain below the recommended rates (Haigis et al., 1999; Thigpen, 2006; Ibrahim et al., 2015a). The concept of microdose fertilization (FM) was developed in the late 1990s to tackle this low fertilizer use. This technique consists in applying small amounts of mineral fertilizer (2 to 6 g) in the planting holes at planting or next to the seedlings after emergence (Buerkert et al., 2001; Muehlig-Versen et al., 2003; Twomlow et al., 2006). Common fertilizer formulations are DAP (18-46-00), NPK (15-15-15 or 14-23-14) and urea (46-00-00). FM rates in West Africa generally aim at providing between 0.2 to 0.4 g P hill⁻¹ (Tabo et al., 2007; Bakayoko et al., 2011; AGRA, 2014). Depending on fertilizer type (NPK, DAP, with or without additional urea), crop type and seeding density, FM provides 6-46 kg N ha⁻¹, 2-12 kg P ha⁻¹, and 0-14 kg K ha⁻¹. Because it is more financially accessible to smallholder farmers, this approach has been widely promoted in production in SSA, mainly for millet, sorghum and maize (CORAF/WECARD, 2011; Twomlow et al., 2010; Camara et al. 2013; AGRA, 2014). Average yield improvements of 50% have been reported for sorghum following FM application (Tonitto and Ricker-Gilbert, 2016), but increases greater than 100% have been reported in some studies (Buerkert et al., 2001; Aune et al., 2007; Hayashi et al., 2008; Bagayoko et al., 2011).

Despite the many advantages of FM, the challenge that is increasingly emerging from its scaling up is the high variability in crop response often observed from one field to another (Twomlow et al., 2010; Camara et al., 2013). An analysis of millet response to FM conducted by Biielders and Gérard (2015) in Niger on 276 farmers' fields indicated that, due to high variability, FM was not profitable in 34% of farms.

High crop yield variability is not specific to microdose fertilization. It has been observed for various fertility management practices in sub-Saharan countries such as fertilizers, conservation agriculture, or cereal-legume intercropping (Fermont et al., 2009; Giller et al., 2011; Sommer et al., 2013; Ronner et al., 2015; Falconnier et al., 2016). This variability in crop response is most often attributed to the spatial heterogeneity of soil fertility. For instance, in SSA, many authors have reported on the occurrence of a fertility gradient around homesteads or villages (Prudencio, 1993; Samaké et al., 2005; Zingore et al., 2007), nearby plots being in general more fertile than distant plots (Schlecht et al., 2001; Achard and Banoin, 2003; Tittonnell et al., 2005). Various studies have shown that the response of cereal crops to fertilizer inputs is often better on the less fertile, distant plots (Vanlauwe et al., 2006; Zingore et al., 2007). Thus, poor responses to fertilizer inputs may result from a good soil fertility status, especially when the quantity of applied nutrients is low as with FM (Biielders and Gerard, 2015; Tovihoudji et al., 2019).

Poor response to fertilizer inputs may also result from deficiencies in nutrients other than those provided by the fertilizers (Njoroge et al., 2017b). Although it is well established that nitrogen and phosphorus are the most limiting nutrients in the majority of agricultural soils in SSA

(Bationo et al., 1998; Masvaya et al., 2010; Kurwakumire et al., 2014), some soils have multiple deficiencies and only respond when multiple nutrient restoration strategies are implemented (Zingore et al., 2008; Kihara et al., 2016). In addition to nutritional deficiencies, non-response or differences in soil response to fertilizer inputs may also result from constraints related to physical (compaction, depth, etc.) or chemical (acidity, toxicity) characteristics that require prior lifting (Voortman et al., 2004; Kihara et al., 2016; Serme et al., 2018).

In addition to soil factors, rainfall is a fundamental factor governing the response to fertilizers under rainfed conditions. Kravchenko et al. (2005) observed that the coefficient of variation of crop yields reaches 45% in years of low rainfall, but only 14% in years of above-average rainfall. This phenomenon is potentially more important in semi-arid and arid sub-Saharan areas characterized by high spatial and temporal rainfall variability (Akponikpè et al., 2011; Traore et al., 2015). For example, following FM application, Camara et al. (2013) observed millet yield increases in only 2 out of 4 years in areas with lower rainfall while for areas with higher rainfall, yield increases were observed each year. In addition to the biophysical factors mentioned above, farm-management practices can also play a decisive role in the response to fertilization. Indeed, farmers sometimes give priority to plots perceived as more fertile (Tittonell et al., 2005) or, on the contrary, to the least fertile areas within a plot (Lamers and Feil, 1995). In addition, late planting or poor weed management can lead to poor fertilizer responses (Kamanga et al., 2014; Tovihoudji et al., 2019). Finally, deep placement of fertilizers (around 10 cm) tends to give better responses compared to

more superficial applications (Ibrahim et al., 2014; Nkebiwe et al., 2016).

Variability in crop yield response to fertilizers is a major challenge for the promotion of fertilization in the sub-Saharan context (Njoroge et al., 2017a). The work of Vanlauwe et al. (2016) clearly shows that the risk of not gaining the expected yields is high when causal factors of variability are not considered by extension services. Taking this into consideration is imperative for FM since this technology targets risk-averse smallholder farmers for whom FM offers a real opportunity for transition to more productive systems (Aune and Bationo, 2008). To this end, it seems useful to perform a meta-analysis of crop response to FM as a function of the biophysical environment in which the technique is being implemented. Recently, Okebalama et al. (2017) and Demisie (2018) conducted narrative literature reviews that report on the performance and challenges associated with the FM technology. However, these reviews did not explicitly address questions related to crop response variability. Tonitto and Ricker-Gilbert (2016) included FM in their meta-analysis of sorghum yield responses to nutrient management practices in Africa. However, their work was limited to sorghum and covered only 18 pairs of data related to FM, which seems insufficient to assess specifically the factors that influence FM yields. The purpose of this work was therefore to conduct a meta-analysis of scientific published data on FM in SSA in order to assess crop yield variability in response to FM and determine the main factors potentially associated with this variability. Such an analysis seems timely given that it is about 20 years since the first studies on FM in SSA were

published, and a reasonable number of studies are now available for the main cereal crops millet, sorghum and maize.

2.2. Materials and methods

2.2.1. Selection of studies

The present meta-analysis focusses on the practice of localized fertilizer application as applied in SSA to cereal crops. It is commonly referred to as "fertilizer microdosing". The literature research was conducted by querying the Scopus and ScienceDirect databases, the Google Scholar search engine and the ResearchGate network to collect scientific journal articles, conference proceedings, theses and grey literature documents regarding the FM technique. Search was limited to the period from 1991 to 30 March 2019. The keywords used were in English: fertilizer micro(-)dosing, fertilizer (hill) placement, microfertilization, reduced mineral fertilizer, minute application of fertilizer, strategic fertilizer application; and in French : *fertilisation microdose, microdose d'engrais, microfertilisation*.

Based on titles and summaries, 78 documents dealing with at least one FM study conducted in SSA were selected. The documents were read in detail to select those studies that met the criteria listed in Table 2.1. A 'study' is defined here as an experiment conducted at a given location (e.g. locality, region or country), in a given growing season or year. Each document could therefore possibly include several studies and a study could include several pairs of data (yield of an unfertilized control compared to the yield of an FM treatment) for at least one of the three cereal crops.

Tableau 2.1: Criteria used for inclusion of studies in the meta-analysis.

Inclusion Criteria	Comments
Study conducted after 1990	Period of conceptualization of Fertilizer microdosing (FM) in sub-Saharan Africa
Mineral fertilizer applied to millet, sorghum and maize according to the FM concept as defined.	FM has occasionally been tested on other crops, but the number of such studies is too limited to be included in a meta-analysis.
Study indicating the yields of treatment without fertilizer and at least one FM treatment	The objective is to assess the magnitude of the response associated with FM in a given context. Thus, when FM has been tested in combination with another practice (organic manure for example), the control must be the practice without fertilizer (in this example, organic manure alone).
Study conducted in stations or on-farm areas	The objective is to analyze variations in response in real environments. Thus, pot, greenhouse and survey studies were excluded.

Data from the same study but reported in several documents were included only once. In that case, the document with the most complete data was used. In situations where only the average of several studies conducted over several seasons or years was provided, this was taken into account, provided that the pooled studies compare the same treatments for the same crop. In the end, 30 documents were selected (27 articles, 1 thesis and 2 reports from the grey literature; Table 2.2), comprising 121 studies and 488 data pairs, spread across 11 countries. Figure 2.1 shows the location of study sites included in the meta-analysis.

Tableau 2.2: List of documents used in the meta-analysis and their main characteristics.

Reference	Country	Experimental years	Crop	Type of experiment	Number of data pair
Tovihoudji et <i>al.</i> , 2019	Benin	2014-2015	maize	On-farm	4
Tovihoudji et <i>al.</i> , 2017	Benin	2014-2015	maize	On-station	20
Saba et <i>al.</i> , 2017	Burkina Faso	2010-2011	millet, sorghum	On-farm	12
Ibrahim et <i>al.</i> , 2016	Niger	2013-2014	millet	On-station	16
Okebalama et <i>al.</i> , 2016	Ghana	2012-2013	maize	Researcher-managed on-farm	18
Abdalla et <i>al.</i> , 2015	Sudan	2009-2013	sorghum	Researcher-managed on-farm	8
Kisinyo et <i>al.</i> , 2015	Kenya	2008	maize	On-station	18
Bielders et <i>al.</i> , 2015	Niger	2000-2002	millet	On-farm	8
Ibrahim et <i>al.</i> , 2015b	Niger	2013-2014	millet	On-station	16
Ibrahim et <i>al.</i> , 2015c	Niger	2013, 2014	millet	On-station	4
Ibrahim et <i>al.</i> , 2014	Niger	2008-2009	millet	On-station	8
Sime et <i>al.</i> , 2014	Ethiopia	2011-2012	maize	Researcher-managed on-farm	9
Kamanga et <i>al.</i> , 2014	Malawi	2003	maize	On-farm	20
Camara et <i>al.</i> , 2013	Mali	2010-2011	millet, sorghum	On-farm	20

Reference	Country	Experimental years	Crop	Type of experiment	Number of data pair
Mashingaidze et al.,2013	Zimbabwe	2006-2008	maize	On-farm	12
Aune et al., 2012	Mali	2007-2008	millet, sorghum	On-farm	12
Jamil et al .2012	Mali	2010-2011	millet	On-station	4
Bakayoko et al., 2011	Burkina Faso, Mali, Niger	2001-2006	millet	On-farm, On-station	45
Aune et al., 2011	Sudan	2007	millet, sorghum	On-farm, On-station	38
CORAF/WECARD, 2011	Burkina Faso, Mali, Niger, Senegal	2005-2007	millet, sorghum	On-farm, On-station	20
Twomlow et al., 2010	Zimbabwe	2004-2006	maize, millet, sorghum	On-farm	33
Pale et al., 2009	Burkina Faso	2003-2005	sorghum	On-station	16
Hayashi et al., 2008	Niger	1999-2002	millet	On-farm, On-station	17
Aune et al., 2007	Mali	2001	millet, sorghum	On-farm	8
Opala et al.,2007	Kenya	1998	maize	Researcher-managed on-farm	3
Ncube et al.,2007	Zimbabwe	2002-2004	maize	On-farm	10
Tabo et al., 2007	Burkina Faso, Mali, Niger,	2002-2003	millet, sorghum	On-farm	14

Reference	Country	Experimental years	Crop	Type of experiment	Number of data pair
Manyame, 2006	Niger	2003-2004	millet	Researcher-managed on-farm	60
Muehlig-Versen et al., 2003	Niger	1995-1996	millet	On-station	12
Buerkert et al., 2001	Niger	1998-1999	millet	On-farm	3

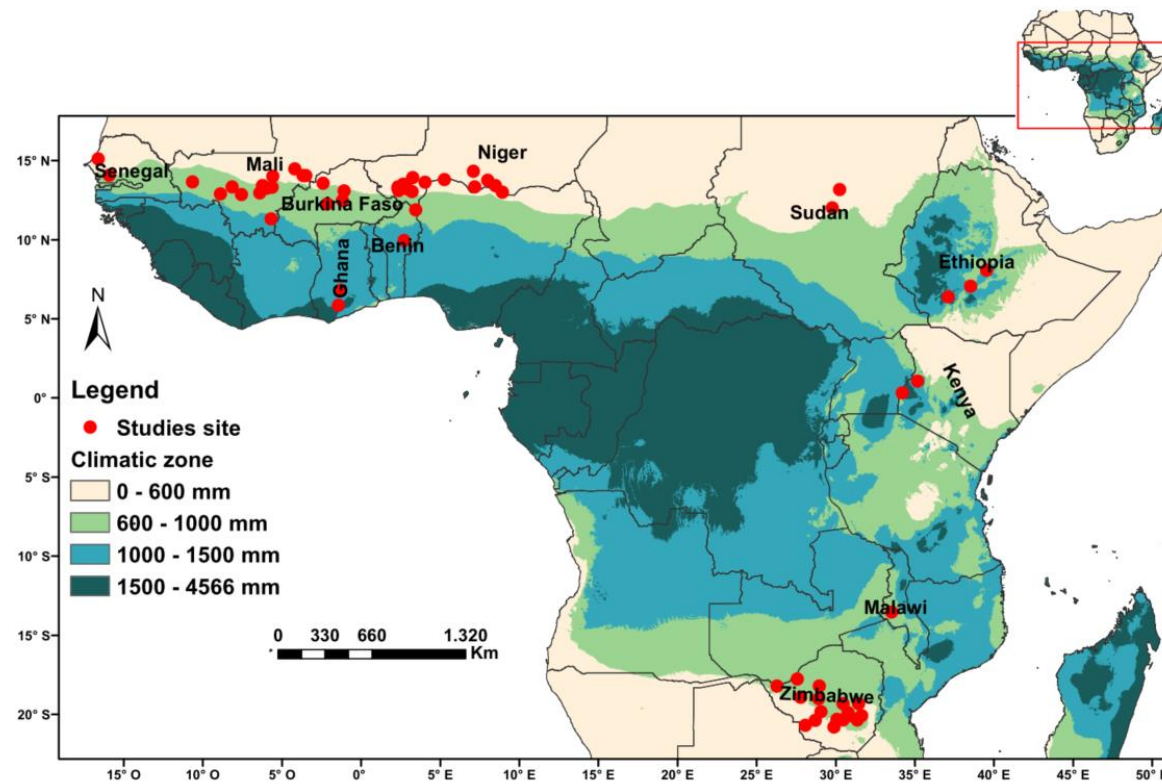


Figure 2.1: Location of study sites included in the meta-analysis.

2.2.2. Data extraction and analysis.

For each study, yields were extracted from tables and graphs. When the data were presented in graphical form, they were digitized using the Graph Grabber V2.0 software. In addition to yields, statistical measures (standard deviation, standard error, standard error of the difference, least significant difference, coefficient of variation, P-value, etc.) were also encoded and the following variables were extracted when available: geographical coordinates of the site, type of crop and variety, number of replicates, sowing density, seasonal and/or annual rainfall during experimentation, average annual rainfall of the area, type and texture of the soil, soil pH and nutrient contents (N, P, and K), type of fertilizer and rate applied per hill or per hectare, timing of fertilizer application, and type of trial (on-station, on-farm, researcher-managed on-farm). When the site coordinates or average annual rainfall were not provided, they were filled-in using information available on Google Earth and WorldClim Global Climate Data (<http://worldclim.org/version2>), respectively.

The variables for which there were sufficient observations were used to analyze their impact on crop response to FM. Classes were created for these variables. Three classes were specified for the type of crop (sorghum, millet, maize) as well as for observed rainfall (≤ 600 mm, 600-800 mm, 1000-1200 mm). For the latter, the 800-1000 mm class was not considered because of lack of data. Because observed rainfall was not always reported, average annual rainfall of the area was also used, with three classes (≤ 600 mm, 600-1000 mm, > 1000 mm). The choice of class boundaries was in part driven by the need to ensure a certain balance in terms of number of studies among classes. Soils were characterized by

their texture in three classes, with reference to the USDA triangle (Tonitto and Ricker-Gilbert, 2016): light-textured soil (sandy, loamy sand, sandy loam, sandy clay loam), medium-textured soil (loam, silt loam, sandy clay), and heavy-textured soil (silty clay, clay). Too few documents provided information on nutrient levels and soil pH in the experimental plots to allow for these factors to be taken into account.

Four classes were established for the type of nutrients provided (N, P, N+P, N+P+K). Considering the common FM rates targeted in West Africa, three classes of P (≤ 6 , 6-12, > 12 kg P ha⁻¹) and four classes of N (≤ 10 , 10-20, 20-30, > 30 kg N ha⁻¹) were established. The practices most commonly combined with FM such as organic amendments (OM), water conservation techniques and seed priming (soaking the seeds in water for about eight hours prior sowing) were used as classes.

Crop response to FM (effect size) for each data pair was expressed as the ratio of the yield of the FM treatment to the yield of the unfertilized control treatment. The natural logarithm of this ratio Eq. [2.1] was used for the meta-analysis to reduce the risk of non-normally distributed data (Johnson and Curtis, 2001; Chivenge et al., 2011; Tonitto and Ricker-Gilbert, 2016).

$$\ln \left(\frac{\bar{X}_t}{\bar{X}_c} \right) \quad \text{Eq. [2.1]}$$

Where $\bar{X}_t$ = the average yield of the FM treatment, and $\bar{X}_c$ = the average yield of the control treatment.

Very few studies provided statistical measures that would have allowed determining the standard deviations of treatment averages. Therefore, to compute the overall mean response and the mean response of the classes

of variables of interest, the response of each pair was weighted according to Eq. [2.2], and the confidence intervals were derived by non-parametric bootstrap at 95% confidence intervals with 1000 iterations (Adams et al., 1997; Lajeunesse, 2013).

$$W_i = \left(\frac{n_t \times n_c}{n_t + n_c} \right) \quad \text{Eq. [2.2]}$$

Where n_t = sample size of the FM treatment and n_c = sample size of the control treatment.

For studies in which several FM treatments (e.g., different FM rates) were compared to the same control, the responses of each treatment were considered independent and included in the calculation of the mean response. The occurrence of non-independence may lead to an underestimation of the standard error of the mean response and thus an underestimation of its confidence interval (Gurevitch et Hedges, 1999). However, inclusion of these treatments in the analysis allows for a better estimation of the mean effect compared to an estimation that would have been done with a reduced number of observations after removing these treatments. Moreover, the bootstrap confidence interval tends to be conservative compared to the parametric confidence interval calculation (Adams et al., 1997).

2.2.3. Explanation and data quality assessment

The OpenMEE software (Wallace et al., 2017) was used for the meta-analysis. Data quality was assessed by analyzing publication bias and sensitivity (Philibert et al., 2012). A funnel plot was generated with the effect size (response) on the horizontal axis and the inverse of the square root of the sample size on the vertical axis, and an asymmetry test was performed by regression testing (Metafor package of R). The asymmetry test of the funnel plot was not significant ($t = -0.4975$, $df = 474$, $p = 0.6190$; Figure A.1, Appendix A), suggesting the absence of publication bias. The sensitivity of the group or category effect means to individual observations was examined by leave-one-out meta-analysis (Wallace et al., 2017). There were few or no influential observations and the group averages calculated after removing these observations remained well within the limits of the group's confidence interval calculated with these observations included.

The responses observed by group were considered significant (different from zero) when their confidence intervals did not contain the zero value, and significantly different from each other when their confidence intervals did not overlap (Chivenge et al., 2011; Tonitto and Ricker-Gilbert, 2016; Wortman et al., 2017). To facilitate the interpretation of the responses (effect sizes), the results are presented as the percentage variation in yield of FM compared to the control. In addition, for some groups, the FM response was also presented in terms of absolute yield variation (difference in yield between FM and control) in kg ha^{-1} to show the expected real yield gain under such conditions.

2.3. Results and Discussion

2.3.1. Microdose fertilization response by crop type

Average yields of unfertilized millet, sorghum and maize are 577 ± 349 , 591 ± 234 and 1491 ± 1125 kg ha⁻¹, respectively. On average for all studies, the application of FM leads to a 68% increase in yield compared to the control (Figure 2.2a). There was no significant difference between the three crops when the increase was expressed as a percentage. In terms of absolute yield, however, yield gains are significantly different, with an average yield gain ranging from 260 kg ha⁻¹ for millet to 930 kg ha⁻¹ for maize (Figure 2.2b). This reflects the yield potential of these crops as well as the climatic and soil conditions in which they are grown, millet being dominant in the most unfavorable areas while maize dominates in the more favorable areas of SSA.

The yield increases confirm the overall relevance of FM as a means to boost cereal crop productivity levels in SSA with input levels that remain accessible to smallholder farmers (Aune and Bationo 2008; Tomlow et al., 2010; Van der Velde et al., 2013; Okebalama et al., 2017). The average performance reported here is significantly better than that previously reported by Tonitto and Rickert-Gilbert (2016) for FM applied to sorghum. Their meta-analysis showed an average increase of about 50%, but this was calculated for a significantly smaller number of data pairs (n=18) than the present meta-analysis.

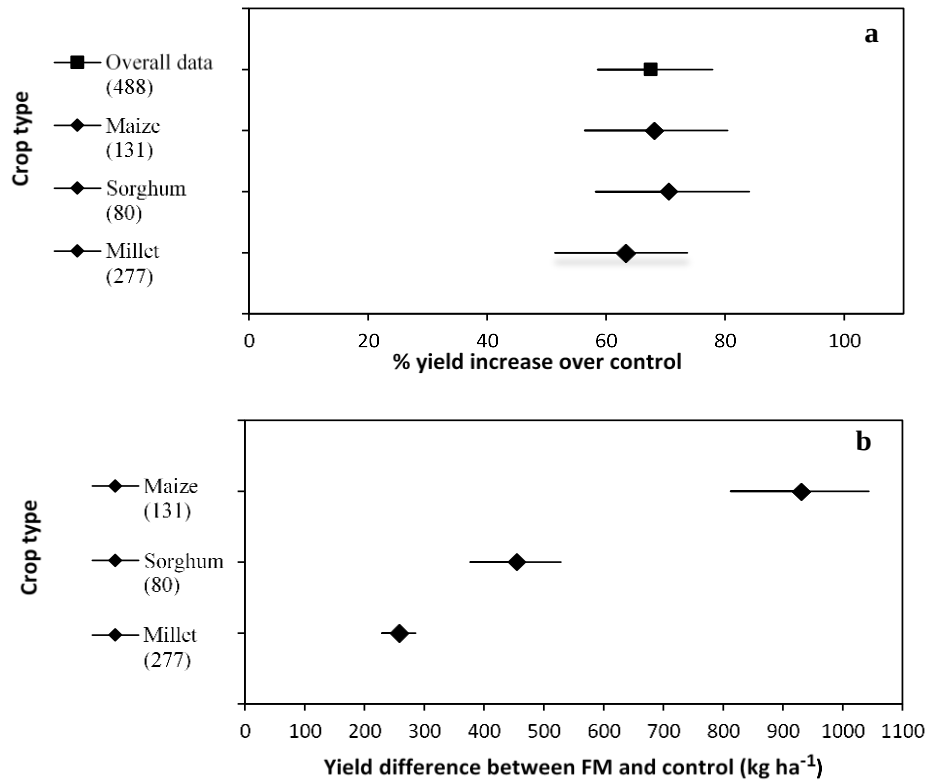


Figure 2.2: Yield increase following microdose fertilization (FM) relative to the control by crop type, expressed as a percentage (a) and absolute value (b). The numbers in brackets represent the number of data pairs that contributed to the calculation of the averages. The error bars represent the 95% confidence intervals obtained by bootstrap.

2.3.2. Microdose fertilization response by climatic zone and observed rainfall.

Figure 2.3a shows a statistically significant increase in the percentage yield gain from 51% in climatic zones with rainfall ≤ 600 mm to 80% in zones with rainfall 600-1000 mm. The percentage yield gain in the rainfall zone >1000 mm is slightly lower than the 600-1000 mm rainfall zone, but not significantly different. The same trends and orders of magnitude are observed with respect to the actual rainfall (Figure 2.3b).

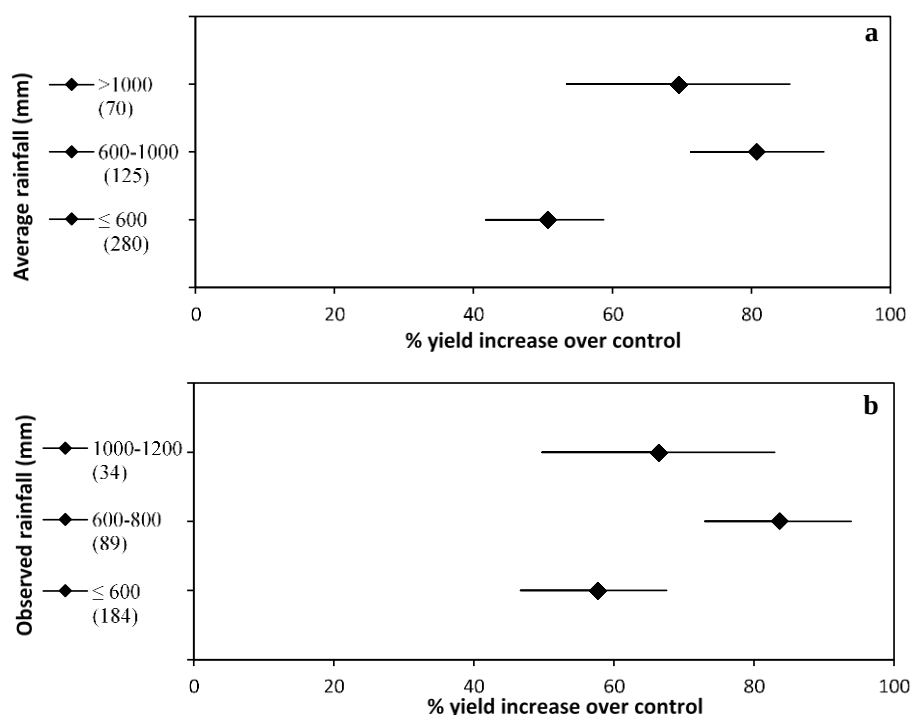


Figure 2.3: Increase in microdose fertilization (FM) yield compared to the control expressed as a percentage per climatic zone (a) and as a function of the observed rainfall (b). The numbers in brackets represent the number of data pairs that contributed to the calculation of the averages. The error bars represent the 95% confidence intervals obtained by bootstrap.

Although millet is preferentially grown in drier areas and maize in wetter areas, the relative yield increases observed in Figure 2.3 do not result from differences in crop type. Indeed, when analyzing the increase in yield by crop type and rainfall class, the percentage increase in FM yield generally increases with the amount of rain received for each crop considered separately (Figure 2.4). For sorghum, the increases are significantly different, with an increase of 53% for the < 600 mm rainfall class and 106% for the 600-800 mm rainfall class. For millet, the average gains increase from 54% to 81% for the same two rainfall classes,

respectively, but they are not statistically significant. For maize, the average gains increase significantly from 65% (<600 mm) to 100% (1000-1200mm), respectively. The increasing trend is therefore most likely the result of better agronomic fertilizer use efficiency, as demonstrated in the West African savannah zone with increasing rainfall (Amouzou et al., 2018). It is worth noting that the recommended FM application rate (g hill^{-1}) for a given crop is independent of the rainfall class, i.e., the observed trends are not the result of adjustments in the FM application rate with rainfall.

In their meta-analysis of sorghum yield response to nutrient inputs (mineral and organic), Tonitto and Rickert-Gilbert (2016) also found an increasing response as a function of rainfall, with a yield increase of 36% in the 420-620 mm rainfall zone, 69% in the 730-890 mm zone and 105% in the 900-1150 mm zone. On the contrary, Chivenge et al. (2011) observed a better relative response of maize to fertilizer application in the < 600 mm zone compared to the 600-1000 mm zone, while noting that the absolute yield response remained better in the higher rainfall zone. Ichami et al. (2019) did not observe a significant effect of rainfall on the relative increase in maize yield following the application of fertilizer. For this latter publication, however, the number of observations considered was low (6 in wetlands and 18 in sub-humid areas). It is difficult to conclude at this stage whether the different trends observed across studies result from true differences in crop response depending on type and mode of application of fertilizers, or from the fact that the meta-analyses rest on different sets of publications.

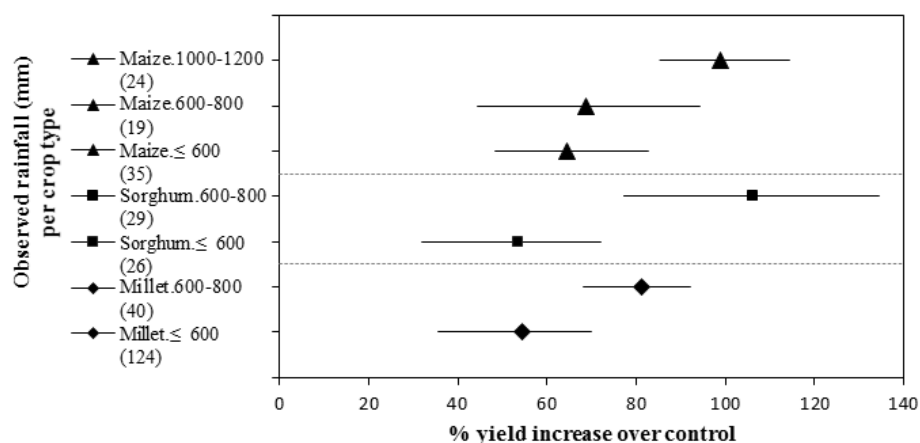


Figure 2.4: Increase in microdose fertilization (FM) yield compared to control per crop type and observed rainfall class. The numbers in brackets represent the number of data pairs that contributed to the calculation of the averages. The error bars represent the 95% confidence intervals obtained by bootstrap. The number of studies on sorghum and millet in rainfall areas > 1000 mm were insufficient for analysis.

2.3.3. Microdose fertilization response by soil texture

As shown in Figure 2.5, the relative mean yield increase is 60% for light-textured soils and increases to 81% for medium-textured soils (Figure 2.5a). For heavy-textured soils, the level of increase decreases to 30% and is significantly lower than that of light and medium-textured soils. In terms of absolute yield gains, the same trends are also observed (data not shown).

So far, FM has been promoted in the semi-arid tropics. Higher yield increases on medium-textured soils compared to light-textured soils could therefore result from the fact that these soils have better water retention capacity and consequently a lower risk of water stress. On these medium-textured soils, all other factors being equal, water is therefore

expected to limit crop response to fertilizer inputs less often than on light-textured soils.

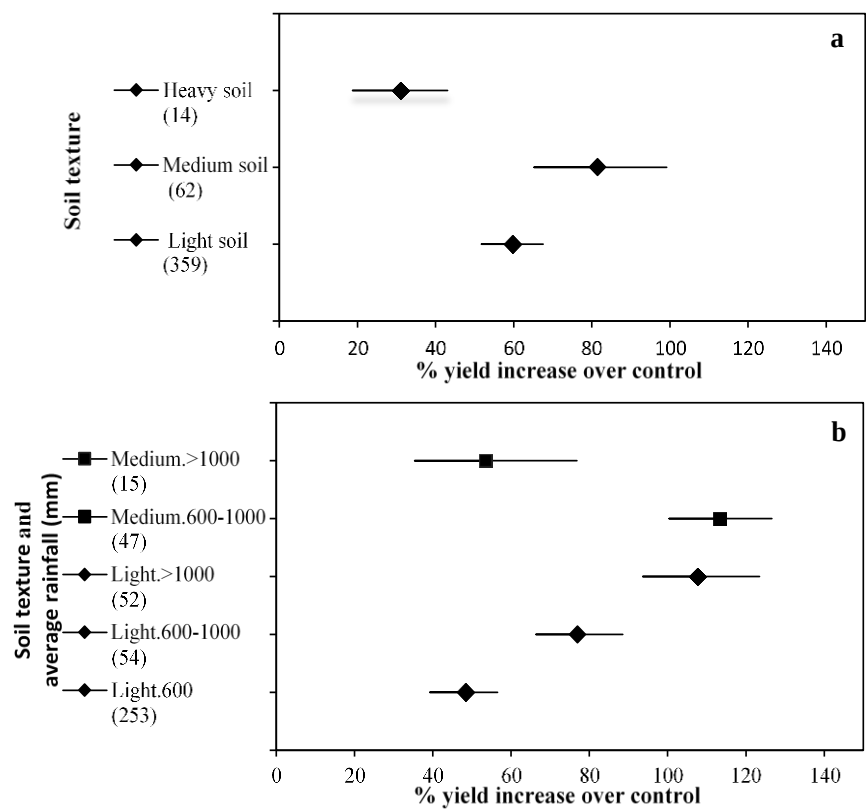


Figure 2.5: Increase in microdose fertilization (FM) yield compared to control based on soil texture, for all data (a) and by climate zone (b). The numbers in brackets represent the number of data pairs that contributed to the calculation of the averages. The error bars represent the 95% confidence intervals obtained by bootstrap.

This reasoning should in theory also apply to heavy-textured soils, yet the relative yield increases on heavy-textured soils are smaller than those observed on light textured-soils (Figure 2.5a). The meta-analysis of maize response to fertilizer inputs conducted by Ichami et al. (2019) also revealed lower responses on heavy-textured soils, although it was not statistically different. Soils with heavy texture are often located at the

bottom of slopes or in depressions. They are inherently more fertile and, because of their topographical position, may benefit from organic matter and nutrients eroded upstream (Phiri et al., 1999; Kissou et al., 2018). In general, on relatively more fertile plots, when water stress is no longer limiting, yields in control plots tend to become higher (Amouzou et al., 2018), and the relative increase in yield following FM could thereby decrease. Indeed, Biolders and Gérard (2015) also observed a decreasing response as a function of the productivity level of the control plot in microdose trials. This observation was also made by Ichami et al. (2019) with respect to fertilization in general. Thus, for FM, heavy-textured soils could be considered as 'rich, less-responsive soils' as defined by Vanlauwe et al. (2011). The low responsiveness on clay soils is likely to be further exacerbated by the fact that 40% of the data for heavy-textured soils were derived from studies testing minute amounts of fertilizers (0.3 to 0.9 g/hill), 7 to 20 times less than in conventional FM.

For medium-textured soils, the yield gain is 113% in the 600-1000 mm rainfall class but drops significantly to 53% in the > 1000 mm rainfall class (Figure 2.5b). This drop in response between 600-1000 and > 1000 mm could again be due to the fact that the yields of the control plots are better in the > 1000 mm area than in the 600-1000 mm area. For light-textured soils, no decrease in relative response is observed in the high rainfall zones. On the contrary, there is an increasing response to FM as a function of rainfall (Figure 2.5b). These sandy soils (45-100% sand) are generally not very fertile, with a low water retention capacity (Manu et al., 1991; Wortman et al., 2017; Kissou et al., 2018). Thus, the addition of small amounts of fertilizer combined with good rainfall, can result in high crop response. The above hypotheses could have been analyzed if

soil chemical data had reported. However, few studies provide this information. Therefore, further researches are needed to address these questions.

Our results are not consistent with Tonitto and Ricker-Gilbert (2016) and Sileshi et al. (2019) who reported that the response to nutrient application was best on light-textured soils. In addition, Chivenge et al. (2011) reported the worst responses for medium-textured soils, followed by light- and heavy-textured soils that were not significantly different. It is difficult to identify the origin of these discrepancies, since the studies differ in terms of data sets used but also in terms of type of fertilizers and fertilization methods studied.

2.3.4. Microdose fertilization response according to the dose and type of nutrient provided

Figure 2.6 shows that NP or NPK fertilizer applications lead to similar levels of response (around 70%), that are significantly higher than applications of P or N alone. The fact that the best responses are observed when phosphorus (P) and nitrogen (N) are provided together is consistent with the fact that these are the most limiting for crop production in SSA (Bationo et al., 1998; Masvaya et al., 2010; Kurwakumire et al., 2014). Nevertheless, data corresponding to N applications alone come from studies conducted in East and South Africa, mainly in the semi-arid zone of Zimbabwe (Twomlow et al., 2010; Ncube et al., 2007; Mashingaidze et al., 2013; Kamanga et al., 2014). In this area, the scaling-up of FM focused on nitrogen inputs because field and crop simulation tests showed the possibility to increase cereal yields using small amounts of N only ($\approx 10 \text{ kg of N ha}^{-1}$).

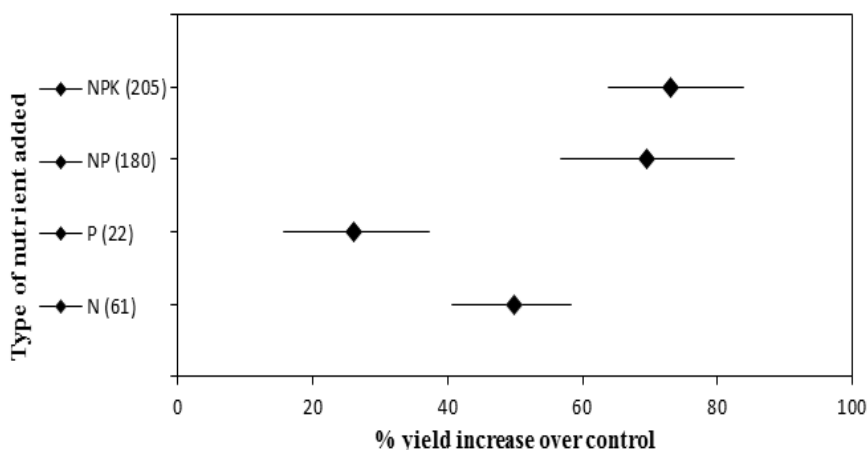


Figure 2.6: Increase in microdose fertilization (FM) yield compared to control based on the type of nutrients supplied. The numbers in brackets represent the number of data pairs that contributed to the calculation of the averages. The error bars represent the 95% confidence intervals obtained by bootstrap.

Multi-site tests conducted by Njoroge et al. (2017a) and Kihara et al. (2016) support this view. They reported that N appears to be the most limiting element in this area due to continuous cropping without legumes and very limited application of fertilizer N or manure. However, in Mali for example, Kihara et al. (2016) reported that P was the most limiting. This is consistent with research reported by Buerkert et al. (2002) for West Africa. Therefore, the scaling-up of FM in West Africa has so far focused on phosphorus, while also providing nitrogen (Buerkert et al., 2001; Camara et al., 2013; Bakayoko et al., 2011; Biielders and Gérard, 2015). Chikowo et al. (2010) showed that the uptake efficiencies of N and P tend to improve when they are applied simultaneously.

Figure 2.7 shows crop response as a function of rates of N and P. It should be noted that in most studies, these elements were combined (Figure 2.6). There is a clear trend towards increasing yield gains with increasing P

doses on light-textured soils (Figure 2.7a). On medium-textured soils, however, the response appears independent of the dose of P. Following the addition of N, the response trends are positive and similar for both textural classes, the response levels being higher on average on medium-textured soils than on light-textured soils (Figure 2.7b).

The lack of response to increasing doses of P could result in part from the fact that the inherent availability of P may be better on medium-textured soils, especially under high rainfall conditions, thereby partly masking the response within the range of fertilizer rates used in FM. Indeed, in the humid savannah area of West Africa, Nwoke et al. (2003) found a strong positive correlation between the amount of P in the soil solution and the clay content. In addition, Vanlauwe et al. (2006) reported that, although the responses to P inputs were a function of soil P contents, the wide variability in P content between plots masked a clear response to P. Alternatively, the small amounts of P provided in FM could be poorly available to crops due to its binding with amorphous and crystalline forms of aluminum and iron which are common in strongly-weathered tropical soils (Chikowo et al., 2010).

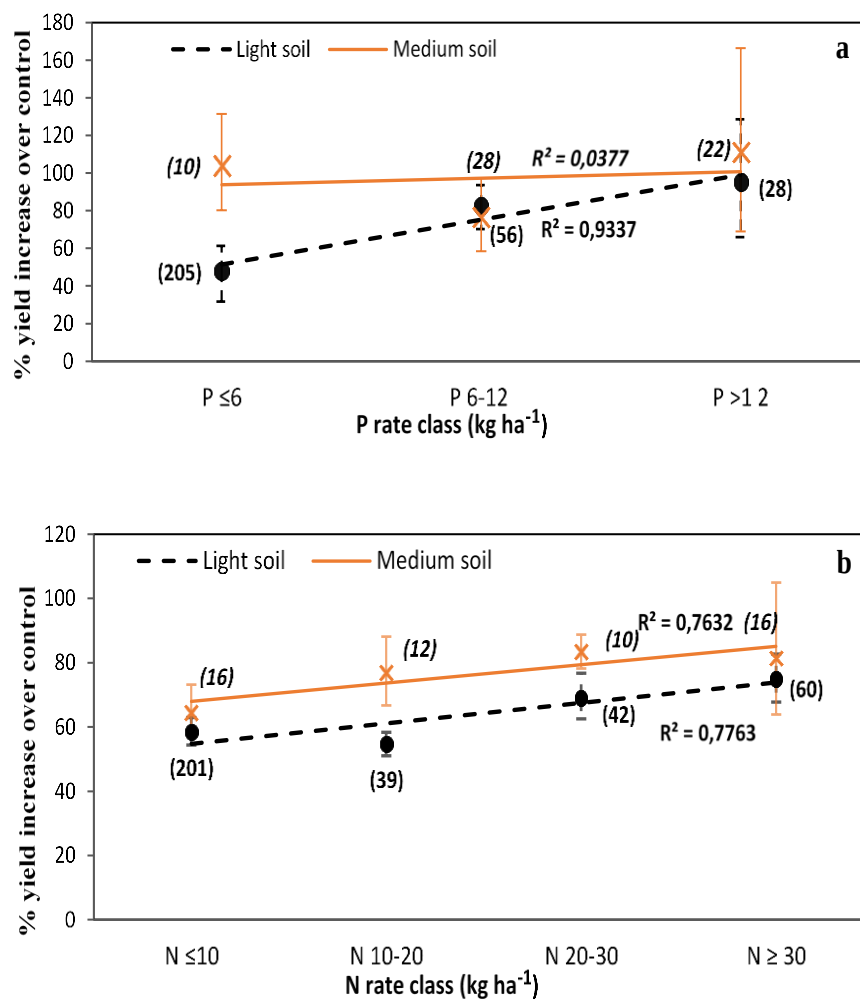


Figure 2.7: Increase in microdose fertilization (FM) yield compared to the control based on P (a) and N (b) application rates per soil texture type. The numbers in brackets represent the number of data pairs that contributed to the calculation of the averages. The error bars represent the 95% confidence intervals obtained by bootstrap.

2.3.5. Microdose fertilization response by type of associated practice

Thirty-one of the studies analyzed have tested FM in combination with other practices such as organic amendments, water conservation techniques and seed priming. Figure 2.8 illustrates the amplitude of crop response to FM when combined with these practices. As a reminder, the response is the excess yield attributable to FM compared to the practice alone. The results indicate that in relative (Figure 2.8a) and absolute terms (Figure 2.8b), the highest gains are observed when FM is combined with water conservation techniques such as the Zaï or planting basins, tied ridges, and mulching (Pale et al., 2009; Mashingaidze et al., 2013; Ibrahim et al., 2015b). As a matter of fact, water conservation measures appear to induce a synergistic effect, i.e., the response to FM is substantially larger when combined with water conservation measures than in the absence of these measures. Although these combinations were mostly tested in environments where water shortage is expected, the results nevertheless clearly demonstrate the importance of improving soil water availability in order to increase the efficiency of fertilizer use in areas with low rainfall (Fatondji et al., 2006; Zougmore et al., 2014; Farooq and Siddique, 2016).

The lowest yield responses to FM are observed when combined with organic amendments (OM) and seed priming (pre-wetting of seeds). The latter likely results from the fact that only minute amounts of fertilizer (0.3 to 0.9 g/hill) were combined with the seed priming (Aune et Ousman, 2011; Aune et al., 2012 ; Abdalla et al., 2015). While some previous studies reported an additive effect when combining FM with OM (Manyame, 2006; Ibrahim et al., 2015a; Somda et al., 2017,

Tovihoudji et al., 2019), it appears here that the yield increase attributable to FM on plots amended with OM is lower than on unamended plots (FM only).

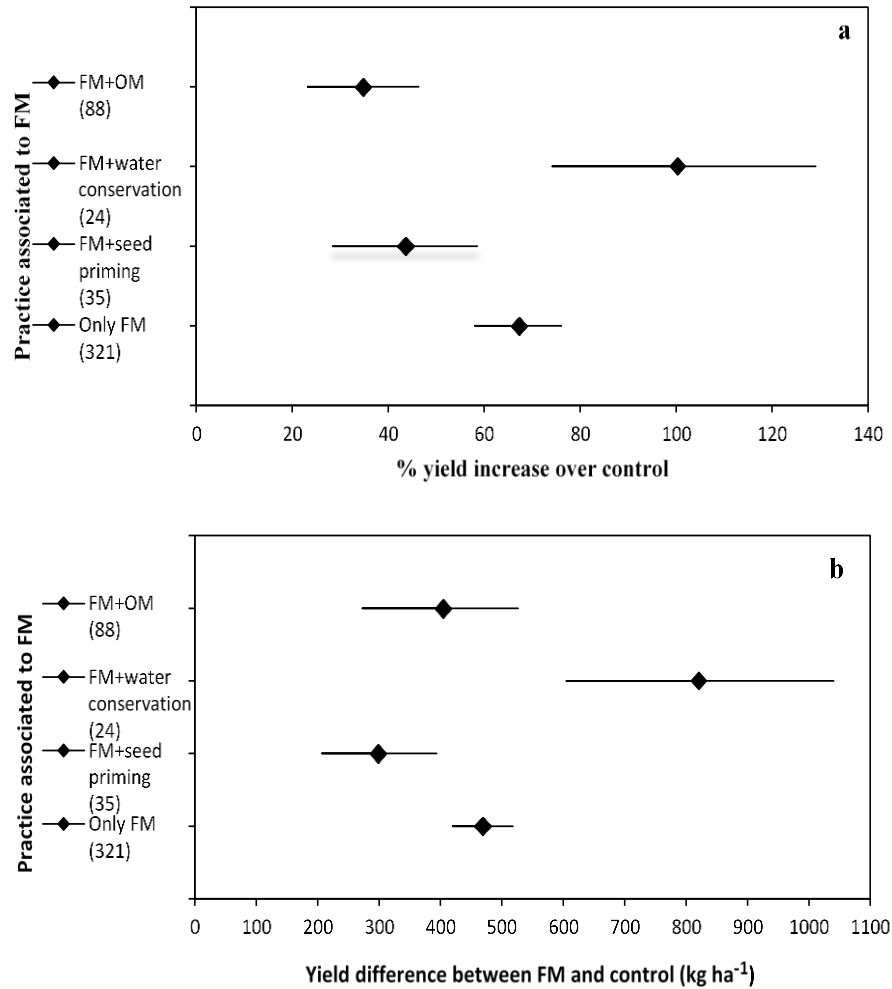


Figure 2.8: Increase in microdose fertilization (FM) yield compared to the control as a function of the associated practice, expressed as a percentage (a) and in absolute value (b). The numbers in brackets represent the number of data pairs that contributed to the calculation of the averages. The error bars represent the 95% confidence intervals obtained by bootstrap. OM refers to organic amendment.

Chivenge et al. (2011) also reported that negative interactions between organic amendments and fertilizers are most frequently observed. The benefits of OM therefore appears to come primarily from the nutrients provided. This would be true under conditions that favor rapid decomposition of the OM. Under such conditions, the agronomic efficiencies of N and P (yield gain/unit of nutrient applied) are not significantly different whether the recommended amount of fertilizer is entirely provided by mineral fertilization or when part of the nutrient requirements are substituted by organic amendment inputs (Sileshi et al., 2019). Wortman et al. (2017) pointed out that on sandy soils with low biological activity and/or in arid conditions, soil moisture and hence mineralization of organic matter may be limited. Consequently, the effect of organic matter in improving soil moisture can become more important than the nutrients released. Under these conditions, an increase in the amplitude of FM response with organic matter may be observed.

2.3.6. Research needs.

A meta-analysis was used to analyze the factors that determine the variability of crop yield response to FM. Major trends were highlighted: (i) relative yield increase is independent of the type of cereal crop (maize, sorghum, millet); (ii) yield response to FM is better on medium-textured soils than on light- and heavy-textured soils; (iii) yield response to FM increases with rainfall level, with a limit on finer-textured soils in the highest rainfall areas (>1000 mm); (iv) water conservation techniques have a synergistic effect on yield response in low rainfall areas; (v) yield response to FM decreases when combined with OM inputs.

While these conclusions can usefully be integrated into FM extension efforts, several questions remain unaddressed. First, it was not possible to determine whether chemical fertility or water-related issues best determine the tendency towards reduced response on heavy-textured soils or on medium-textured soils under high rainfall conditions (Figure 2.5 and Figure 2.7). More generally, this meta-analysis revealed similarities and divergences with others studies (Tonitto and Ricker-Gilbert, 2016; Chivenge et al., 2011), noticeably with regard to the effects of soil type on crop response to fertilization. Thus, future FM studies should focus more on the effect of soil type, and in particular on heavy and medium-textured soils. Second, Leiser et al. (2014), Gemenet et al. (2015) and Gemenet et al. (2016) have shown that millet and sorghum yields increase with phosphorus uptake (amount of P uptake ha⁻¹), and that this capacity depends among others on varieties. However, the effect of crop variety could not be analyzed due to the great diversity of varieties reported across studies.

Furthermore, it emerged that the effect of FM is reduced when combined with OM (Figure 2.8). However, studies have shown that the response to organic fertilizer inputs is a function of the quality (nitrogen, polyphenol and lignin content), quantity and type of organic fertilizer (Chivenge et al., 2011; Wortman et al., 2017). Future research should aim at finding combinations of doses and types of organic amendments leading to synergistic effects when combined with FM, as a function of soil types and agro-climatic conditions. Finally, it would be useful to have studies in which the different ways of applying fertilizers are compared. Such studies exist, but not in sufficient numbers to allow for a reliable meta-analysis at this stage.

2.4. Conclusions

The meta-analysis of millet, sorghum and maize response to FM in SSA indicates that, on average, this technique improves yields by almost 70%. This confirms the relevance of the FM technology in boosting productivity on smallholder farms with more affordable levels of investments than classically recommended fertilization rates. Yet the analysis also reveals that soil and climatic conditions strongly impact the mean response to FM. Such effects must be better integrated into extension schemes to provide farmers with the best possible information and to target FM technology to sites where the highest gains can be obtained. Based on the analysis, the following recommendations can be issued regarding FM: (i) overall, apply N+P fertilizer rather than either one alone, although cost of fertilizer may have to be taken into consideration as well; (ii) give priority to medium-textured soils, then to light-textured soils; (iii) do not give priority to inherently fertile soils (low responsive soils); (iv) combine FM with water conservation techniques in drought-sensitive areas; (v) if the availability of OM is limiting, it may be more effective not to combine FM and OM on the same plots. Nevertheless, there appear to be complex interactions between several factors, in particular between soil and climate, yet the information provided in most studies is insufficient to properly unravel the processes that underlie these interactions. In order to improve on the above guidelines, it will thus be necessary to further test the hypotheses underlying them through site-specific field experiments that cover a range of well-documented factors that could not be analyzed in this study.

Chapitre 3

Drivers of sorghum response to fertilizer microdosing in smallholder farms across Burkina Faso

Adapted from:

Ouedraogo, Y., Taonda, JB. S., Sermé, I., Tychon, B., & Biielders, C. L. (2021). Drivers of sorghum response to fertilizer microdosing on smallholder farms across Burkina Faso. *Submitted to Field Crops Research*

Abstract

Fertilizer microdosing (FM) is being disseminated to resource-limited smallholder farmers within the framework of sustainable intensification to boost crop productivity. However, scaling up of this technology revealed that yield response variability may be a barrier to its adoption. A total of 351 on-farm trials across three agro-climatic zones (Sissili (Z1): 800-1000 mm, Oubritenga (Z2): 600-800 mm and Zandoma (Z3): ≤ 600 mm annual rainfall) over two years in Burkina Faso were conducted in order to identify the factors driving sorghum yield response to FM. The trials were stratified to consider soil types (indigenous classification) as well as the distance between homesteads and fields as a criterion of fertility. Additional variables included previous crop management practices and weed pressure. On average, FM application increased yields by 385, 571 and 388 kg ha⁻¹ in Z1, Z2 and Z3, respectively. The proportion of fields with a value-cost ratio (VCR) ≥ 2 was 34% in Z1, 56% in Z2, and 30% in Z3. In the three zones, yield response to FM tended to increase with increasing soil depth and plot duration of cultivation, as well as with the proper timing of weeding and fertilizer application. Within Z1, lower responses were observed on stony-gravelly and sandy soils compared to black and gravelly soils. Moreover, poorer responses were observed on plots previously amended with high amounts of fertilizer compared to soils with moderate and no previous fertilizer application. Better responses tended to be observed on plots with legumes as antecedent crop. In Z2, the best responses were observed on clayey soils compared to other soils. In Z3, stream bank soils, followed by upland soils, showed the best responses. In addition, in this zone, yield response increased when

sowing was delayed given that delayed sowing tended to reduce yields more strongly on control plots compared to FM plots. Overall, crop response to FM was affected by (i) soil type and geomorphology which reflect a given level of inherent fertility and soil depth, (ii) plot history through the duration of cultivation, the antecedent crop and the previous fertilization rate, and (iii) proper plot management. The relative importance of these factors was site-specific and can be easily communicated to farmers given that they are based on local knowledge and practices.

Keywords: Fertilizer microdosing, yield variability, sorghum, fertilizer response, smallholder farmers, Burkina Faso, sub-Saharan Africa.

3.1. Introduction

Fertilizer microdosing (FM) is a practice that consists in the localized placement of small amounts of mineral fertilizer (2-6 g) in the planting holes at sowing or next to the seedlings after emergence (Buerkert et al., 2001; Twomlow et al., 2006; Hayashi et al., 2008). Analysis of work on microdose fertilization since its conceptualization by ICRISAT in the 1990s shows that this technology favors smallholder farmers' access to fertilizer and significantly improves crop yields (Okebalama et al., 2017; Demisie, 2018; Ouedraogo et al., 2020). Thanks to the localized placement of fertilizer, FM yields as much or more than broadcast fertilization at rates commonly recommended by extension services yet requires 30-50% less fertilizer (Muehlig-versen et al., 2003; Palé et al., 2009; Fatondji et al., 2016). Therefore, this technique is seen as an opportunity for resource-constrained farmers to move towards more productive and sustainable production systems (Aune and Bationo, 2008).

FM has been widely promoted in sub-Saharan Africa (SSA) over the last decade (Twomlow et al., 2010; Camara et al., 2013; AGRA, 2014). However, like many other agricultural technologies, FM is being disseminated to farmers without really considering the variability of its performance related to the biophysical heterogeneity of the environment and farm contexts (Zingore et al., 2007; Fermont et al., 2009; Vanlauwe et al., 2015; Falconnier et al., 2016; Kihara et al., 2016). Recommendations are usually provided based on expected average performance at the national or regional level, without considering the large variations in crop yield response often observed across fields and/or farms (Vanlauwe et al., 2016). Thus, there is a risk

that this indiscriminate extension scheme of FM stunts the interest of farmers who would experience yield responses below the expected range and lower than expected economic profitability (Biielders and Gerard, 2015).

The first evidence of variability in FM response was reported in the works of Buerkert et al. (2001), Twomlow et al. (2010), Tabo et al. (2011) and Camara et al. (2013), albeit with no specific focus of these authors on the drivers of variability. The study of Biielders and Gérard (2015) focused specifically on the variability of millet response to FM in southwest Niger. These authors reported that 34% of the 276 studied plots fell below the profitability threshold. Similar work on maize in a more humid area in northern Benin on 51 plots found a probability of non-profitability ranging from 6% to 86% depending on the fertilizer and maize price scenarios (Tovihoudji et al., 2019). Both studies observed that yield response to FM tended to increase as yields in control plots decreased. Recently, Ouedraogo et al. (2020) analyzed the factors of variability of FM at the scale of sub-Saharan Africa for millet, sorghum and maize by meta-analysis. They highlighted major response trends as a function of climate, soil texture and practices associated with FM (i.e., organic amendments, water harvesting techniques). As previously reported by Tabo et al. (2011), these authors showed that the response to FM tends to increase with the level of rainfall. From this meta-analysis, it was also found that the response to FM is better on medium-textured soils than on heavy and light-textured soils. However, in order to turn these results into operational recommendations, they must be refined and further validated by field experiments that take into consideration, for each agro-climatic zone, the complex interactions

that can occur between climate, the diversity of soil types, and cropping practices (Nyamangara et al. 2011; Vanlauwe et al., 2016; Boubou Diallo et al., 2019). The objective of this study was therefore to identify the factors driving sorghum response to FM in three agro-climatic zones of Burkina Faso and to draw up recommendations with regard to the biophysical domains and cropping practices for which the best responses are observed.

3.2. Materials and methods

3.2.1. Study area

The study was conducted in three provinces of Burkina Faso, corresponding to three agro-climatic zones following the south-north climatic gradient of the country (Figure 1.3, Table 1.2). These were the Sissili province in the central-western part of the country, Oubritenga in the central part, and Zandoma in the northern part. Rainfall in the three provinces follows a unimodal distribution with a rainy season from May to October. However, the amount of rainfall generally does not allow to start sowing operations until early June in Sissili and late June in Oubritenga and Zandoma. In each province, a municipality was chosen based on the availability of farmer organizations that are active in the promotion of FM. These were the municipality of Bieha (11° 03' 26"N, 1°49' 20" W), Nagreongo (12°28'58" N, 1°11'36"W), and Gourcy (13°13' 00" N, 2°21'00" W) in Sissili, Oubritenga, and Zandoma provinces, respectively (Figure 1.3). In each municipality, three villages were selected to widen the diversity of environmental contexts.

3.2.2. Set-up of on-farm trials

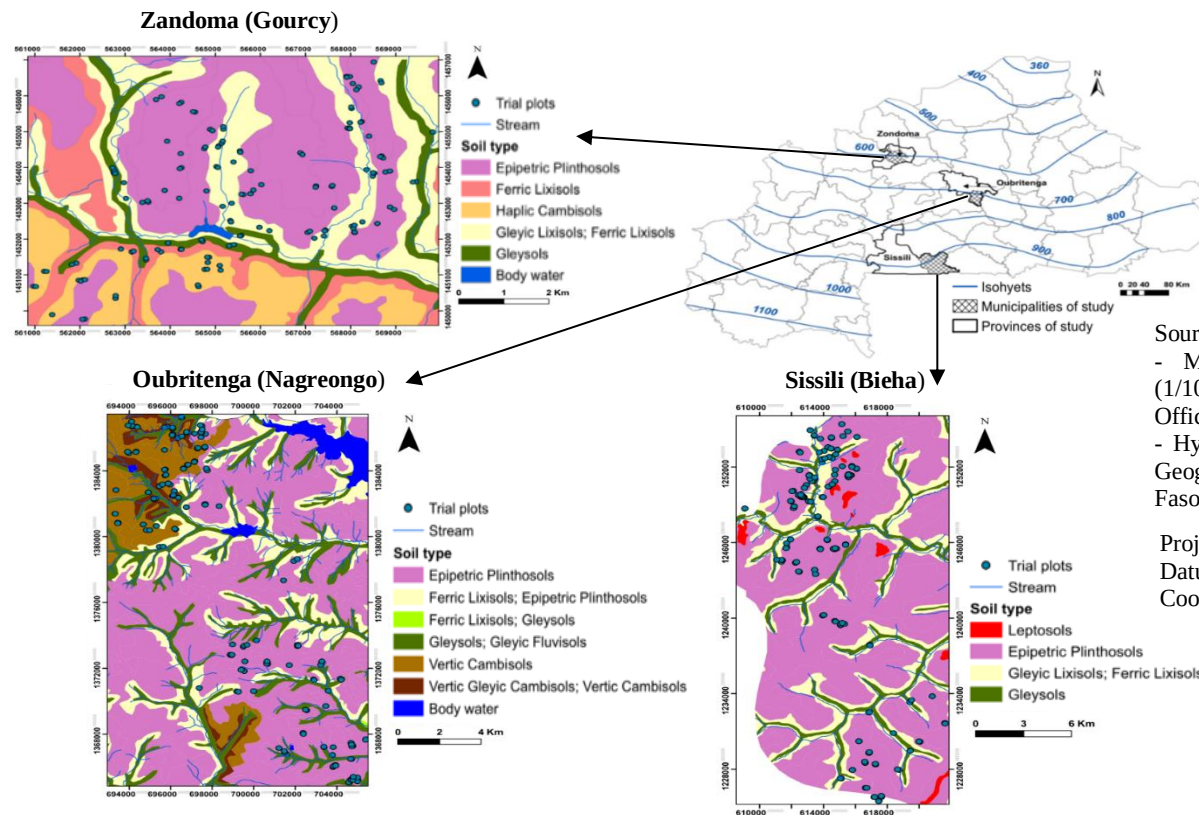
3.2.2.1. Identification of trial plots

To capture response variability, it is necessary that the location of experimental plots reflects the heterogeneity of cropland in the study areas. Taking soil samples on all sites and analyzing them prior to plot selection is impossible in practice (Ronner et al., 2015). Considering soil types based on available soil mapping (1:100 000 scale) would ignore soil variations that may occur over shorter distances. It was therefore decided to choose farmer's classification of soil types as a soil stratification criterion. This is a pragmatic classification related to the characteristics and behavior of the cultivated soils, and it is based on the following criteria: topographical position, texture, color, and water retention (Kissou et al., 2014; Kissou et al., 2018). Thus, focus groups were organized in the villages to identify the soil types used for sorghum growing (Table 3.1), a crop that is grown in all three regions. The carbon and nutrient (N, P and K) contents of the soil types are shown in Table C.3 (Appendix C).

In addition, the distance of the plot from the farmer's homestead was retained as a stratification criterion, as it is associated with a gradient in soil fertility (Prudencio, 1993). Hence, the plots were categorized into: (i) homestead plots (0 - 100 m from the homestead), (ii) village plots (100 m - 1 km from the homestead), and (iii) bush plots (> 1 km from the homestead). For each combination of soil type and distance from homestead (soil x distance), plots were proposed by farmers belonging to the farmers' organizations involved in the study in each province. Those plots were subsequently visited to ensure that they indeed met the required criteria.

The choice was made to focus on the combination of these two stratification factors (soil type and distance) in order to have a sufficient number of plots each year (between 6 and 10 plots) for each combination of factors. Note that not all Soil type x Distance combinations exist. It was further assumed that plot selection based on these two criteria would also encompass a diversity of plots in terms of cropping history (number of years of cultivation, crop rotation and fertility management).

The experiments were conducted in 2018 and 2019. Each year, around 75 plots were set up in each province, trying as much as possible to balance the different soil x distance combinations. In total, the trial was set up on 445 plots over the two years in the three provinces (Figure 3.1). In the three provinces, plots categorized as "homestead plots" often corresponded to very small areas (< 0.05 ha on average), something that was also described by Prudencio (1993). Many of these plots were thus too small to accommodate the experimental design (0.06 ha without the alleys between treatments). In addition, given that homestead plots are considered more fertile than more remote plots due to high organic matter inputs, they are usually used for growing maize and/or vegetables. Consequently, farmers were reluctant to let these plots be used for trials because of their important function in supplying vegetables. As a result, homestead plots were less represented in the trials than other combinations (9% in Sissili, 12% in Oubritenga, and 6% in Zandoma).



Sources:

- Morpho-pedological mapping (1/100 000) from National Soil Office of Burkina Faso
- Hydrography (1/200 000) from Geographical Institute of Burkina Faso (IGB)

Projection : UTM Zone 30N
Datum : WGS 1984
Coordinates: meters

Figure 3.1: Location of study zones, trial plots, and (co-)dominant soils in the three study zones.

Table 3.1: Soil types in the 3 provinces according to endogenous classification and likely equivalent in World Reference Base (WRB) classification, and their characteristics, qualities and drawbacks according to farmers.

Soil type in Endogenous classification	Characteristics and Landscape position	Soil qualities	Soil drawbacks	Soil name in English	Possible equivalent in WRB classification
Zandoma and Oubritenga (in <i>mooré</i> language)					
<i>Zinka</i>	Gravelly, shallow soil, Up - and mid-slope positions	Low weed pressure	Sensitive to drought	Gravelly soil	Epipetric Plinthosol
<i>Bisga</i>	Sandy, deep soil, Mid - and down-slope positions	Easy to till, Rapid seed germination	Dries quickly, Week seedlings	Sandy soil	Gleyic Lixisol (ferric)
<i>Zi-naaré</i> ¹ (in Zandoma only)	Clayey tendency, deep soil, Flat areas and down-slope position	Retains soil moisture	Requires early sowing	Upper floodplain	Endogleyic Lixisol (ferric), Fluvisols
<i>Bolle</i> (in Oubritenga only)	Clayey, deep soil, Flat areas and mid-slope position	Retains soil moisture	Risk of waterlogging	Clay soil	Vertisol, Vertic Cambisol
<i>Baongo/Kossogo</i>	Clayey tendency, deep soil, Stream bank position	Remains wet during drought periods	Risk of flooding, High weed pressure	Stream bank soil	Eutric Gleysol, Fluvisols

Soil type in Endogenous classification	Characteristics and Landscape position	Soil qualities	Soil drawbacks	Soil name in English	Possible equivalent in WRB classification
Sissili (in <i>nuni</i> language)					
<i>Kapatotia</i>	Presence of stone outcrop, Stony and gravelly, shallow soil, Up-slope and mid-slope positions	Low weed pressure	Difficult to plow and weed, Sensitive to drought	Stony-gravelly soil	Epipetric Plinthosol
<i>Kafnoutia</i>	Gravelly, shallow soil, Up-slope and mid-slope positions	Low weed pressure	Sensitive to drought	Gravelly soil	Epipetric Plinthosol
<i>Kassouloutia</i>	Sandy, deep soil, Down-slope position or flat areas	Easy to plough, Quick seed germination	Quick dryness	Sandy soil	Gleyic Lixisol (ferric)
<i>Tizounoutia</i>	Black soil, Clayey tendency, deep soil, Up -, mid -, or down-slope positions	Fertile soil, Retains soil moisture, Quick seed germination	More rapid yield decline compared to gravelly soil	Black soil	Eutric Gleysol, Vertic Cambisol, Vertisols

¹ Following the toposequence from bottom to top, the *Zi-naaré* soil corresponds to the soils located in the upper part of the stream bank, with a lower occurrence of flooding. We called this location ‘upper floodplain’.

3.2.2.2. Trials

The trials were conducted with sorghum (*Sorghum bicolor*), a crop cultivated both in the northern and southern parts of Burkina Faso. The experimental design consisted of two 300 m² subplots with no replicate: a control treatment without fertilizer and an FM treatment (Figure C.1c, Appendix C). The FM treatment consisted in applying N-P-K (14-23-14) fertilizer at a rate of 2 g/hill (62.5 kg ha⁻¹; sowing density of 31250 hills/ha) on the 15th day after sowing (DAS) and urea (46%) at a rate of 1 g/hill (31.25 kg ha⁻¹) on the 45th DAS. The Kapelga variety (90 - 100 days), which is adapted to the three agro-climatic zones, was used. Considering time, labour and financial constraints, the choice was made to have a large number of experimental sites (plots) without replication of treatments within a plot rather than a more limited number of sites with treatment replications. This allows to generate more information on the factors of variability of the response to FM than having replications within plots with a reduced number of plots (Vanlauwe et al., 2016).

A minimum set of management guidelines was agreed upon with the farmers to minimize the risk of treatment failure and to reduce the variability that may result from too much difference in trial management between farmers. These included: (i) animal-drawn plowing with no organic amendment applied to the plots, (ii) hoe sowing at a spacing of 80 cm x 40 cm, i.e. 31250 hills / ha, (iii) hoe weeding, coupled with thinning to two plants per hill just prior N-P-K fertilizer application, and (iv) hoe weeding just prior to urea application.

3.2.3. Data collection

The trial plots and farmers' homesteads were georeferenced and the distances from plots to homesteads were calculated with ArcGIS 10.4. Besides, the coordinates of the plots were projected onto morpho-pedological mapping shapefiles (scale 1/100,000) of each province provided by the National Soil Office of Burkina Faso (BUNASOLS) to determine the geomorphological positions of the plots. The history of the plots (duration of plot cultivation from 0 to ≥ 30 years, crop rotation over the last 4 years, previous fertilizer and organic amendment application rates, etc.) was recorded through a survey with the farmers. It was difficult for farmers to quantify the organic amendments previously applied. This variable was therefore collected by considering the modalities "yes" and "no", respectively if organic amendments were applied or not. One-kilogram composite soil samples (0-20 cm) from 5 points on the diagonals were collected between the rows of each treatment around 30 DAS. Samples were dried and sieved to 2 mm to determine the proportions of coarse elements. During the wettest month (August), soil depth was surveyed at two locations in each treatment to a maximum depth of 1 m.

Rain gauges were positioned in each village ensuring a maximum distance of 2 km between any given plot and the nearest gauge. Data from the nearest rain gauge were assigned to each plot. Rainfall amounts at different stages of the sorghum development cycle (Gerik et al., 2003) were calculated for each plot: 0-14 DAS (initial growth stage), 15-39 DAS (crop development stage), 40-80 DAS (boot stage to hard-dough stage), 81-100 DAS (hard-dough to physiological maturity).

The dates of the cropping operations conducted on the plots (from ploughing to harvest) were recorded on forms by technicians supported by local facilitators. Weed cover on the plots was assessed by visual observation of the percentage of cover (Chicouène, 1999) using 4 classes: 0-10%, 11-30%, 31-50%, and >50% cover. Weed cover was assessed at 40 and 75 DAS. It was combined with an assessment of the severity of striga infestation (*Striga sp.*) on a scale 1 to 4 (1 = no striga infestation, 2 = low infestation, 3 = moderate infestation, 4 = high infestation). Evidence of crop damage by pests and diseases was also recorded. Grain yields and plant densities were assessed by technicians at physiological maturity for 5 subplots of 25 m² (5 m × 5m) located on the diagonals of each treatment. Areas not representative of plot conditions (partially shaded by tree crowns, presence of termite mound, damage areas, etc.) were avoided. Harvested grain was air-dried and weighed to obtain yields in kg ha⁻¹.

3.2.4. Data analysis

Prior to any analysis, the database was checked to remove data from plots that had not complied with the experimental design, not been weeded, or been destroyed by animals, erosion or flooding. In total, 351 plots were retained (106, 138 and 107 plots in the Sissili, Oubritenga and Zandoma provinces, respectively). In Sissili, 36% of the plots were black soils, 28% were gravelly soils, 25% were sandy soils and 10% were stony-gravelly soils. In Oubritenga, clay and gravelly soils represented 28% each, sandy soils 24%, and stream bank soils 20%. In Zandoma, 43% of plots were gravelly soils, 30% stream bank soils, 17% sandy soils and 10% upper floodplain soils. All analyses were

performed separately for each zone after pooling data from 2018 and 2019. Analyses were done with R 4.0.4.

Descriptive analyses were first performed using box plots, scatter plots, and cumulative probability plots to assess sorghum yield response ($\Delta\text{yield} = \text{Yield FM} - \text{Yield Control}$) as a function of the variables collected. To analyze the risk faced by farmers when applying FM, the level of response needed to obtain a value-cost ratio (VCR) of 2 was calculated for each province.

$$VCR = \frac{(\Delta\text{yield}) \times (\text{Unit price of grain})}{\text{Cost of fertilizer}} \quad \text{Eq. [3.1]}$$

Where Δyield = sorghum grain yield response to FM (kg ha^{-1}), Unit price of grain = unit market price of sorghum grain (local currency, XOF kg^{-1}), and Cost of fertilizer = cost of FM fertilizer (NPK + urea) in XOF.

VCR was calculated considering the average of the lowest market prices of sorghum in each province over the last five years, i.e., 129, 125 and 135 XOF kg^{-1} for Sissili, Oubritenga and Zandoma provinces respectively (data from National Food Security Stock Management Company of Burkina Faso) and the average price of FM fertilizer in the provinces in 2020 (33750 XOF, survey from farmers). It should be noted that the price of fertilizer between provinces does not differ much. The cost of labor for fertilizer application was not considered. According to CIMMYT (1988), a $VCR \geq 2$ is needed to ensure adoption by small-holder farmers in developing countries.

To identify the factors driving variability of FM response, a multiple linear regression was performed with yield response ($\Delta\text{yield} = \text{Yield FM} - \text{Yield Control}$) as the dependent variable and year, biophysical, and management factors as independent variables. Interactions between variables that emerged from the exploratory analysis were included in the multiple regression. Multicollinearity was addressed by removing variables with variance inflation factors (VIF) > 10 , while considering the relevance of the variables for the model (package "car"). The "stepAIC" command of "MASS" package was used for the selection of the best model with the selection direction "both". The contributions of the variables to the percentage variance explained by the model were determined with the "relaimpo" package. The variables not retained in the multiple linear regression were used in a generalized additive model to investigate the variables with possible non-linear relationships with yield response (package "gam"). Finally, only the variables retained as significant in the regressions (linear and non-linear) were reported.

In addition to these regressions, boundary lines of the yield response were investigated as a function of the collected variables (Shatar and Mcbratney, 2004, Fermont et al., 2009). The boundary lines were fitted using nonparametric boundary regression using the "npbr" package (Daouia, et al., 2017). These boundary lines allow to highlight the yield response potential (highest achievable yield response) as a function of the levels of a given variable (e.g., soil depth, weed cover). Only variables that showed a clear trend along the boundary line were retained.

3.3. Results

3.3.1. Year and trial characteristics

The annual rainfall received in 2018 and 2019 in the Sissili (1008 and 996 mm) and Oubritenga (860 and 853 mm) provinces were similar or slightly higher than the average rainfall for the past five years in these areas, which was 945 ± 203 mm in Sissili and 788 ± 66 in Oubritenga (data from National Meteorological Agency and rain gauges placed on the plots). The amount of rainfall in 2019 in the Zandoma (744 mm) province was also within the range received over the last 5 years (733 ± 100 mm), while 2018 (926 mm) was a wetter than average year.

Compared to Oubritenga and Zandoma, the heterogeneity of cropping system factors was more important in Sissili. In the latter province, a wider range of duration of plot cultivation was observed due to the presence of large areas not yet deforested or the occurrence of very long fallows (Table 3.2). Half of the experimental plots in this province had a duration of cultivation or recultivation ≤ 12 years versus 24 years in Oubritenga and 21 years in Zandoma. Sissili is also a maize and cotton growing area (Table 1.2). These crops benefit from higher mineral fertilizer inputs than other crops. Thus, previous fertilizer inputs were on average higher on plots in Sissili than in the two other provinces (Table 3.2). Although the amount of fertilizer applied in Sissili was higher on average, the proportion of plots having benefitted from a previous fertilizer application was higher in Zandoma (70% of plots) compared to Sissili (41%) and Oubritenga (23%). Indeed, the plot history survey revealed that in Zandoma, where soils are generally perceived to be more degraded and where the risk of drought events is

more pronounced, farmers systematically apply small amounts of NPK fertilizer to sorghum plots, which is the staple food of families. Considering only the fertilized plots, the previous amounts of fertilizer applied were $72 \pm 29 \text{ kg ha}^{-1}$ for plots receiving only mineral fertilizer and $62 \pm 21 \text{ kg ha}^{-1}$ for those also receiving organic amendments. Finally, unlike in Zandoma and Oubritenga where legume haulms are systematically harvested and stored for livestock, in Sissili, early-groundnut haulms are generally left on the ground or buried in the plots, which can lead to potential positive side effects. Observance of experimental plot management instructions was generally better in Oubritenga than in the other two provinces (Table 3.2). The first weeding was conducted on average around 17 DAS and NPK fertilizer application around 14 DAS. In addition, weed control was better overall in Oubritenga than in the other two provinces (Table 3.2).

Table 3.2: General and management characteristics of experimental sites in each of the three provinces.

	Sissili				Oubritenga				Zandoma			
	Mean±SD	Min	Med	Max	Mean±SD	Min	Med	Max	Mean±SD	Min	Med	Max
Plots characteristics												
Soil depth (cm)	57 ± 22	15	51	>100	67 ± 21	24	71	>100	73 ± 27	23	80	>100
Distance between plot and farmer's home (km)	1,6 ± 1,4	0,05	1,29	5,46	1,2 ± 1,19	0,03	0,63	4,87	0,98 ± 0,75	0,06	0,81	3,55
Duration of plot cultivation or re-cultivation (year) ¹	16 ± 12	0	12	30	20 ± 11	0	24	30	18 ± 13	0	21	30
Duration of fallow before plot cultivation (year) ²	28 ± 6	2	30	30	17 ± 12	1	20	30	12 ± 10	2	8	30
Previous fertilizer amount (kg ha ⁻¹) ³	93 ± 121	0	0	360	25 ± 51	0	0	300	48 ± 44	0	50	200
Plot Management												
Number of days between start of rainy season and sowing date	25 ± 6	10	26	38	13 ± 6	1	12	27	19 ± 4	9	19	29
Number of days between sowing and first weeding	20 ± 11	7	17	49	17 ± 6	5	15	35	26 ± 8	6	25	45

	Sissili				Oubritenga				Zandoma			
	Mean±SD	Min	Med	Max	Mean±SD	Min	Med	Max	Mean±SD	Min	Med	Max
Plot Management (continued)												
Number of days between sowing and NPK fertilizer application	19 ± 6	8	18	43	14 ± 5	6	14	29	18 ± 6	8	17	41
Number of days between sowing and urea application	45 ± 6	30	46	57	49 ± 6	25	48	63	44 ± 6	30	44	66
Weed cover at 75 DAS (%)	29 ± 19	1	30	70	14 ± 15	1	10	70	19 ± 20	1	10	70

DAS= Days after sowing, Med = Median.

¹ It was difficult for farmers to provide information that went back many decades into the past. Thus, information collected on the duration of cultivation and fallowing of plots were limited to 30 years. ² Only plots under cultivation for less than 10 years have been considered for this variable. It corresponds to 50%, 25 % and 36% of the studied plots in Sissili, Oubritenga and Zandoma, respectively.

³ Average calculated across all plots, including unfertilized plots.

3.3.2. Sorghum grain yield and yield response variability to fertilizer microdosing

Sorghum grain yields followed the level of mean annual rainfall in the agro-climatic zones (Figure 3.2). In Sissili, control yields ranged from 117 to 3520 kg ha⁻¹ and FM yields from 200 to 4000 kg ha⁻¹. Intermediate levels of yield were observed in Oubritenga with yields ranging from 160 to 2480 kg ha⁻¹ for the control and 280 to 3440 kg ha⁻¹ for the FM. Yields were lowest in Zandoma and ranged from 0 to 800 kg ha⁻¹ for the control and from 120 to 1720 kg ha⁻¹ for the FM.

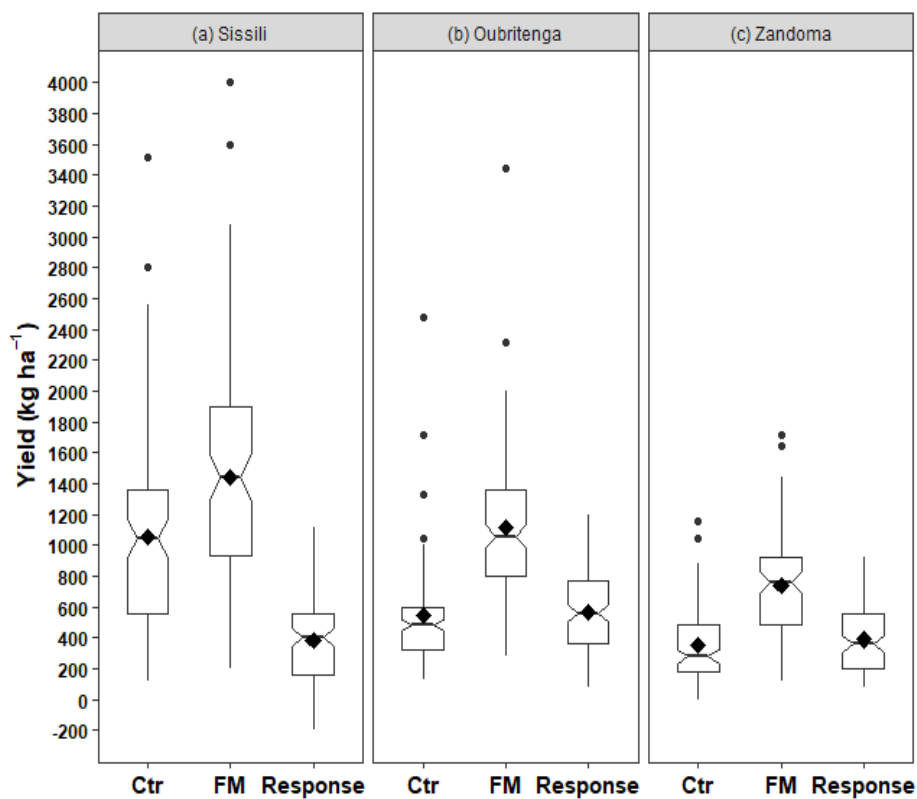


Figure 3.2: Sorghum grain yield distribution for the Control (Ctr) and FM treatments and yield response to FM (response = Yield FM – Yield Control) for the three provinces. The diamond shape in the center of the box indicates the means.

The best responses to FM ($\Delta\text{yield} = \text{Yield FM} - \text{Yield Control}$) were observed in Oubritenga with an average response of 571 kg ha⁻¹, compared to 385 kg ha⁻¹ in Sissili and 388 kg ha⁻¹ in Zandoma (Figure 3.2). Response variability (coefficient of variation) was greater in Sissili (CV=73%) than in Oubritenga (CV=49%) and Zandoma (CV=56%). With the exception of a few plots in Sissili, yield gains ($\Delta\text{yield} > 0$) were consistently observed in FM plots (Figure 3.3). In Zandoma, the response to FM was not directly related to plot productivity as reflected in the yield of the control (Figure 3.3c). In contrast, in Sissili and Oubritenga, response to FM increased with increasing yield in the control plot up to a control yield of 600 (Oubritenga; Figure. 3.3b) or 800 kg ha⁻¹ (Sissili; Figure. 3.3a). Above this optimum value, there is a slight decrease in response for these two provinces. Above 900 kg ha⁻¹ (Zandoma and Oubritenga) and 2000 kg ha⁻¹ (Sissili), the number of observations is insufficient to support a significant trend.

Considering fertilizer and sorghum market prices, the level of FM response that achieves a value-cost ratio (VCR) of 2 was 522, 538, and 501 kg ha⁻¹ in Sissili, Oubritenga, and Zandoma, respectively. Given the small range of variation between provinces, a threshold value of 500 kg ha⁻¹ was used to facilitate comparison. Thus, the proportion of plots achieving a $\text{VCR} \geq 2$ was 56% in Oubritenga versus 34% in Sissili and 30% in Zandoma (Figure 3.2). The proportion of plots for which FM was not profitable ($\text{VCR} < 1$) was 37%, 15%, and 33% in Sissili, Oubritenga, and Zandoma respectively.

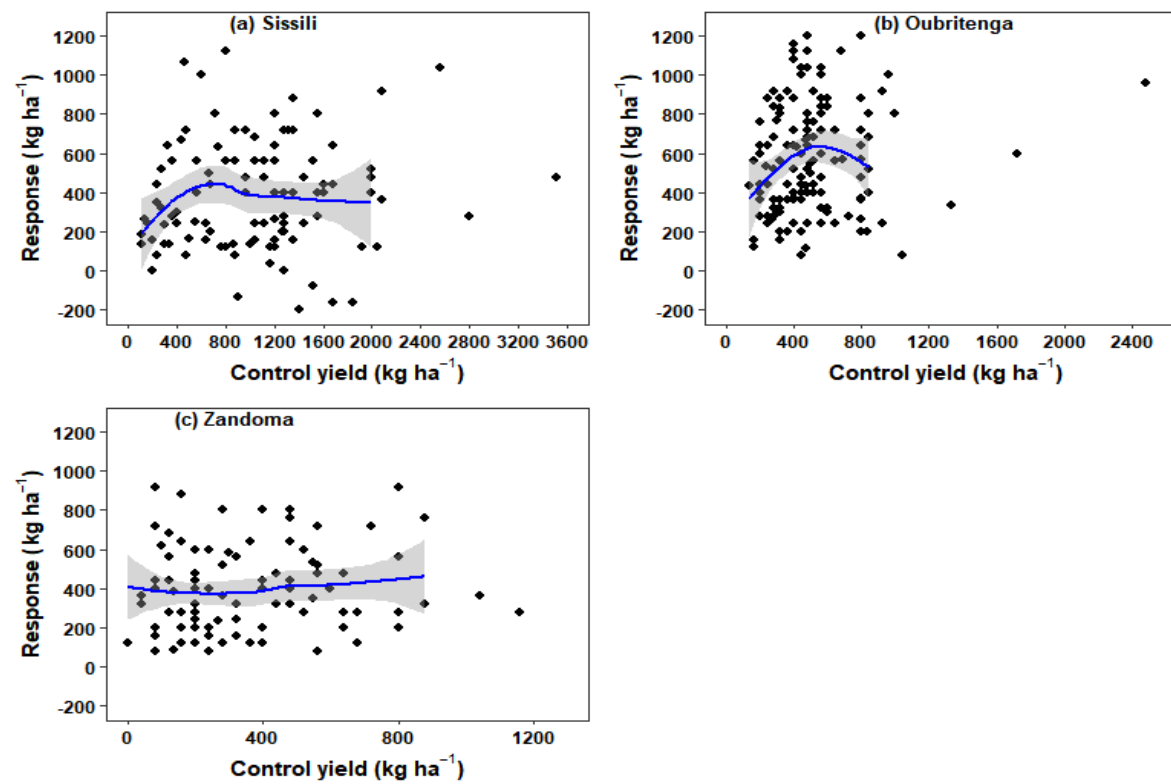


Figure 3.3: Response of sorghum grain yield to FM as a function of yield in control plots in the three provinces. The blue curve corresponds to local regression estimate.

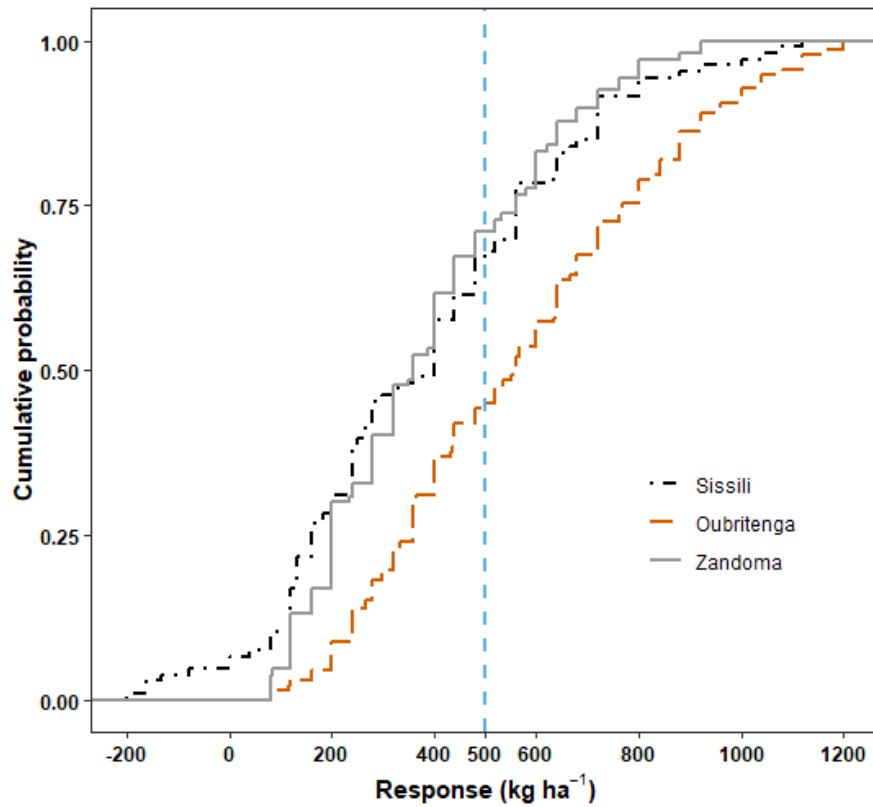


Figure 3.4: Cumulative probability of sorghum grain yield response to FM for the three study provinces. The vertical dashed line corresponds to a yield response of 500 kg ha⁻¹, which in this study corresponds to the response at which the value-cost ratio is ≥ 2 .

3.3.3. Factors explaining variability in sorghum grain yield response to fertilizer microdosing

The model selected by the linear regression for the Sissili province explained 29% of the total variance (Table 3.3). 25% of this variance was explained by the plots' history (the combination of previous crop type and previous fertilizer amount). Trial management characteristics contributed to 40%, of which 25% related to plot weed cover, and 11% and 4% to timing of fertilizer application and weeding, respectively. Soil type and topographical position contributed 18 and 17%, respectively.

On average, the responses observed on stony-gravelly soils and to a lesser extent on sandy soils were significantly lower than on black soils. No significant differences were observed between the response of black soils and gravelly soils (Table 3.3). In terms of topography, the best responses were observed on plots located at mid- and up-slope positions compared to plots at valley bottom position. Significantly lower responses were observed on plots previously amended with high amounts of fertilizers (301-400 kg ha⁻¹) compared to plots with medium or no previous fertilizer application (Table 3.3). Also, better responses were observed on plots with legumes as a previous crop compared to plots with no legumes and no previous fertilizer application. High weed pressure and as well as delayed urea application resulted in significantly lower responses.

Table 3.3: Optimal multiple linear regression model to explain sorghum grain yield response to FM (Δ yield) in the Sissili province.

$\Delta(\text{yield}) = \text{TypSoil} + \text{Landscape} + \text{Fert.Priv.Crop} + \text{IntSowWeed} + \text{IntSowUrea} + \text{Weed.cover}$				
Parameter	Estimate	Std. Error	t value	Pr(> t)
(Intercept)	1173.69	229.46	5.11	1.73e-06 ***
Gravelly soil	-48.62	69.39	-0.70	0.485
Sandy soil	-122.82	69.68	-1.76	0.081 .
Stony-Gravelly soil	-313.48	81.56	-3.84	0.000 ***
Down-slope	51.98	106.56	0.49	0.627
Mid-slope	196.61	100.11	1.96	0.052 .
Up-slope	203.97	105.31	1.94	0.056 .
Cuirassed plateau	-55.24	134.25	-0.41	0.681
0.Fert_leg	150.19	72.23	2.08	0.040 *
100-200.Fert_Cot.Maize	34.89	68.49	0.51	0.611
201-300.Fert_Cot.Maize	77.89	66.07	1.18	0.241
301-400.Fert_Cot.Maize	-381.33	119.81	-3.18	0.001 **
IntSowWeed1	-4.15	2.57	-1.61	0.110
IntSowUrea	-13.67	4.23	-3.23	0.001 **
Weed cover	-5.79	128.90	-4.49	2.07e-05 ***

Significance codes: *** $p < 0.001$, ** $p < 0.01$, * $p < 0.05$, " " $p < 0.1$

Adjusted R-squared: 0.285

F-statistic: 3.996 on 14 and 91 DF, P-value: 2.48e-05

TypSoil = soil type; Landscape = landscape position; Fert.Priv.Crop = previous crop and fertilizer amount; IntSowWeed1 = Interval between sowing and 1st weeding (days); IntSowUrea = Interval between sowing and application of urea (days); Weed cover = weed cover (%).

0.Fert_leg = Legume as previous crops, without fertilizer application;

100-200.Fert_Cot.Maize = Cotton or maize as previous crops, with 100-200 fertilizer amount (kg ha^{-1}); 201-300.Fert_Cot.Maize= Cotton or maize as previous crops, with 201-300 fertilizer amount (kg ha^{-1});

301-400.Fert_Cot.Maize = Cotton or maize as previous crops, with 301-400 fertilizer amount (kg ha^{-1}). “ Black soil ” , “ Valley Bottom” , and “ No legume as previous crops, without fertilizer application” were reference levels in the model respectively for the “soil type”, “landscape position” and “previous crop and fertilizer amount” variables.

In Oubritenga, the model also explained 29% of the total variance (Table 3.4). Two thirds of this explained variance (66%) resulted from the contribution of the soil type. Topographic position contributed to 15%. The interaction between soil type and the amount of fertilizer applied the previous year contributed 8% and soil depth contributed to 7%. The variables "amount of rainfall received at 81-100 DAS" and "amount of previous fertilizer" shared the remaining 4%.

Table 3.4: Optimal multiple linear regression model to explain sorghum grain yield response to FM (Δ yield) in the Oubritenga province.

$$\Delta(\text{yield}) = \text{TypSoil} + \text{Landscape} + \text{Soil depth} + \text{Prev.Fert.Amnt} + \text{Rain.81-100.DAS} + \text{TypSoil:Prev.Fer.Amnt}$$

Parameter	Estimate	Std. Error	t value	Pr(> t)
(Intercept)	43.15	189.96	0.22	0.820
Sandy soil	17.75	81.31	0.22	0.828
Gravelly soil	99.94	107.44	0.93	0.354
Clayey soil	354.69	80.30	4.42	2.14e-05 ***
Valley bottom	54.38	107.54	0.51	0.614
Mid-slope	135.25	72.75	1.86	0.065 .
Up-slope	200.83	73.02	2.75	0.006 **
Soil depth	3.15	1.82	1.73	0.085 .
Prev.Fert.Amount	2.12	1.43	1.49	0.140
Rain.81-100.DAS	0.77	0.51	1.52	0.132
Sandy soil:Prev.Fert.Amnt	-1.12	1.68	-0.67	0.507
Gravelly soil:Prev.Fert.Amnt	-2.03	1.57	-1.29	0.198
Clayey soil:Prev.Fert.Amnt	-3.33	1.60	-2.09	0.039 *

Significance codes: *** p < 0.001, ** p < 0.01, * p < 0.05, "." p < 0.1

Adjusted R-squared: 0.2936

F-statistic: 5.744 on 12 and 125 DF; P-value: 7.92e-8

TypSoil = Soil type; Landscape = landscape position; Prev.Fert.Amnt = Previous crop fertilizer amount (kg ha^{-1}); Rain.81-100.DAS = cumulative amount of rainfall between 81-100 days after sowing (mm). "Stream Bank soil" and "Down-slope position" were reference levels in the model respectively for "soil type" and "landscape position" variables.

Table 3.4, shows that the average response on clay soils was very significantly higher than those observed on other soil types in this province. In terms of topographical position, the best responses were also observed on plots located at mid- and up-slope positions. Soil depth was found to have a positive effect on response. Finally, the improvement in response due to the effect of previous year's fertilizer application was significantly lower on clay soils than on other soil types.

The model selected in the Zandoma province explained only 12% of the total variance (Table 3.5). Soil type contributed 29% of this explained variance, and the duration of cultivation or recultivation of plots contributed 20%. Management variables contributed 41%, including 13% for the timing of urea application, 12% for weed pressure, 9% for the timing of the first weeding, and 7% for the sowing period. Rainfall amounts at 0-14 and 81-100 DAS contributed to the remaining 10%.

In this province, the best responses were observed on average on stream bank soils and, to a lesser extent, on upper floodplain soils (Table 3.5). Besides, the response tended to increase with the duration of plot cultivation. In terms of management factors, delayed weed control and increased weed pressure were found to decrease the response of FM. However, unexpectedly, there was a trend of increasing response with delay in urea application (Table 3.5). An increase in response was also observed with delayed seeding.

Table 3.5: Optimal multiple linear regression model to explain sorghum grain yield response to FM (Δ yield) in the Zandoma province.

$\Delta(\text{yield}) = \text{TypSoil} + \text{Dur.Cult} + \text{IntStartSeasonSow} + \text{Rain.0-14.DAS} + \text{Rain.81-100.DAS} + \text{IntSowWeed1} + \text{IntSowUrea} + \text{Weed.cover}$				
Parameter	Estimate	Std. Error	t value	Pr(> t)
(Intercept)	-542.808	337.687	-1.607	0.111
Upper floodplain soil	145.802	79.334	1.838	0.069 .
Gravelly soil	61.889	54.003	1.146	0.254
Stream bank soil	183.237	62.119	2.950	0.004 **
Dur.Cult	3.442	1.652	2.083	0.034*
IntStartSeasonSow	17.703	8.507	2.081	0.040 *
Rain.0-14.DAS	1.440	0.787	1.832	0.070 .
Rain.81-100.DAS	2.232	1.414	1.578	0.118
IntSowWeed1	-4.688	2.757	-1.700	0.092 .
IntSowUrea	9.363	3.910	2.395	0.019 *
Weed cover	-2.321	1.127	-2.060	0.042 *

Significance codes: *** p < 0.001, ** p < 0.01, * p < 0.05, "." p < 0.1

Adjusted R-squared: 0.118

F-statistic: 2.417 on 10 and 96 DF; P-value: 0.013

TypSoil = Soil type; Landscape = landscape position; Dur.Cult = plot duration of cultivation (years). Rain.0-14.DAS = cumulative amount of rainfall between 0-14 days after sowing (mm); Rain.81-100.DAS = cumulative amount of rainfall between 81-100 days after sowing (mm); IntSowWeed1 = interval between sowing and 1st weeding (days); IntSowUrea = interval between sowing and application of urea (days); IntSowUrea = interval between sowing and application of urea (days); IntStartSeasonSow = interval between onset of season and sowing date (days); Weed cover = weed cover (%). "Sandy soil" was reference level in the model for "soil type" variable.

Further to the linear regressions, the generalized additive model regressions did not highlight non-linear relations between the response and the collected variables. Potential response curves (upper boundary lines) were therefore assessed for the different variables.

These boundary lines inform about the highest possible response that can be achieved based on the field data for a given level of a variable.

In Sissili, boundary lines of yield response were identified as a function of soil characteristics, plot management and duration of plot cultivation (Figure 3.5). An increase in response potential was observed with increasing soil depth and duration of plot cultivation (Figure 3.5a and 3.5c). The lowest response potentials were obtained for soils with depths less than 30 cm. These plots correspond to stony-gravelly and gravelly soils (Figure 3.5a). Beyond 30 cm, the effect of depth on the increase in response is less pronounced and the maximum response was found on mid-slope black soils. A strong decrease in response potential is encountered when the duration of plot cultivation is less than 5 years (Figure 3.5c). From Figures 3.5b and 3.5d, it appears that the increase in coarse element content in the soil and the delay of weeding lead to a decrease of the yield response potential. The expected level of response starts dropping when stone content exceeds approx. 30%. It drops strongly after 30 days without weeding (Figure 3.5d). Finally, the period of NPK application that maximizes yield response potential is at about 15 DAS (Figure 3.5e). Beyond this period, the response potential decreases.

In Oubritenga, the best responses to FM were largely determined by soil type and were observed mostly on clay soils (Table 3.4 and Figure 3.6). The boundary lines were therefore adjusted first with all data, then after excluding clay soils, to separate the effect of other factors from the influence of these clay soils (Figure 3.6).

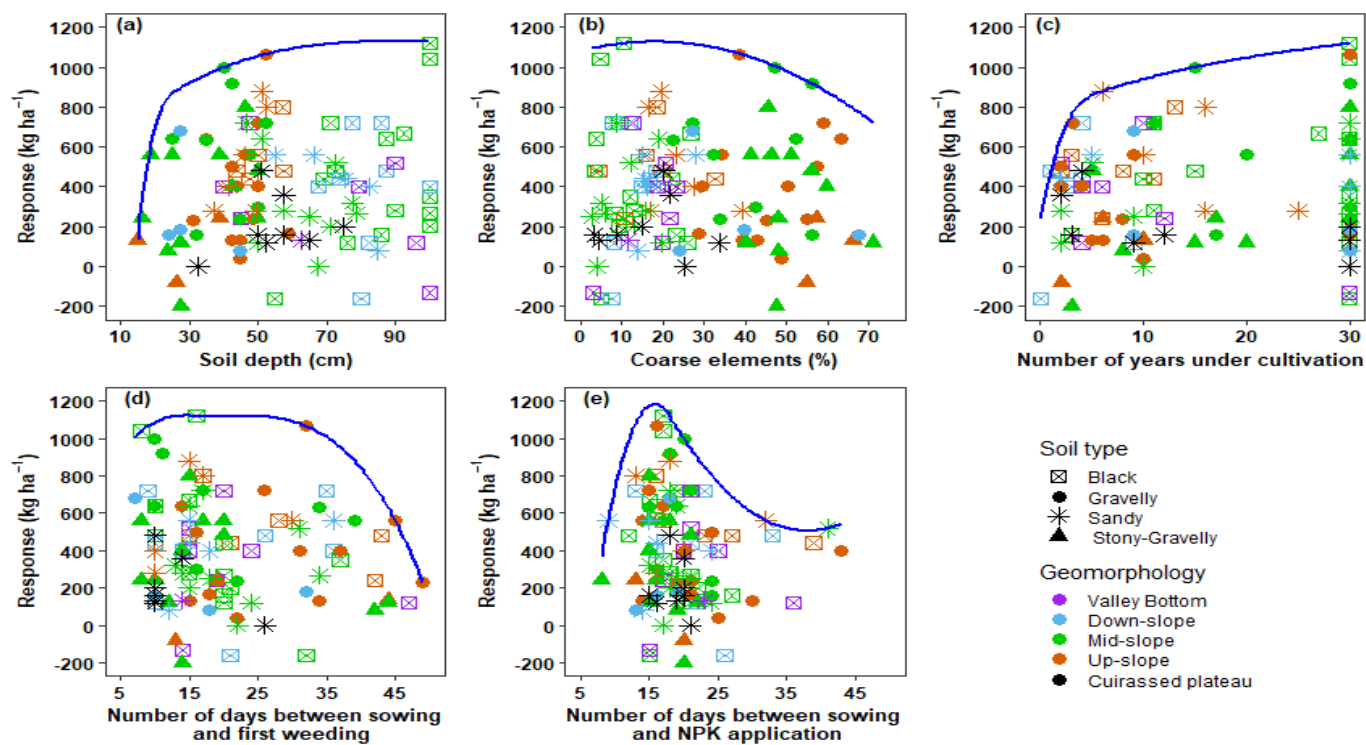


Figure 3.5: Boundary lines for sorghum grain yield response to FM (Δ yield) in the Sissili province for (a) soil depth, (b) percentage of soil coarse elements, (c) number of years the plot has been under cultivation, (d) number of days between sowing and first weeding, (e) number of days between sowing and NPK application.

When clay soils are included, a strong positive relationship between soil depth and the potential response was observed over the entire depth range (Figure 3.6a). Without clay soils, the positive relationship was only found for soil depths < 30 cm on gravelly soils. Beyond this depth, the positive relationship is almost non-existent (Figure 3.6a). Figure 3.6b also shows that the observed negative relationship between yield response and the proportion of coarse elements disappears when clay soils are not included. Finally, when clay soils are included, there is no clear relationship between the response potential and the duration of the plot cultivation due to the important effect of clay soils on the response (Figure 3.6c). In contrast, after excluding clay soils, the lowest response potentials were observed for plots with a cultivation duration < 5 years (Figure 3.6c).

As in Sissili and Oubritenga, positive relationships of response potential with soil depth and duration of the plot's cultivation were found in Zandoma (Figure 3.7a and 3.7b). The lowest response potentials were again observed for shallow soils (depth < 30 cm) and newly cultivated or recultivated plots (< 5 years of cultivation). Also, NPK application around 15 DAS again appeared to maximize yield response potential (Figure 3.7d). This maximization of yield response was also observed on plots with moderate fertilizer applications (around 75 kg ha^{-1}) the previous year (Figure 3.7c). In addition, an almost linear decrease in response potential was observed with the increase of weed pressure (Figure 3.7e).

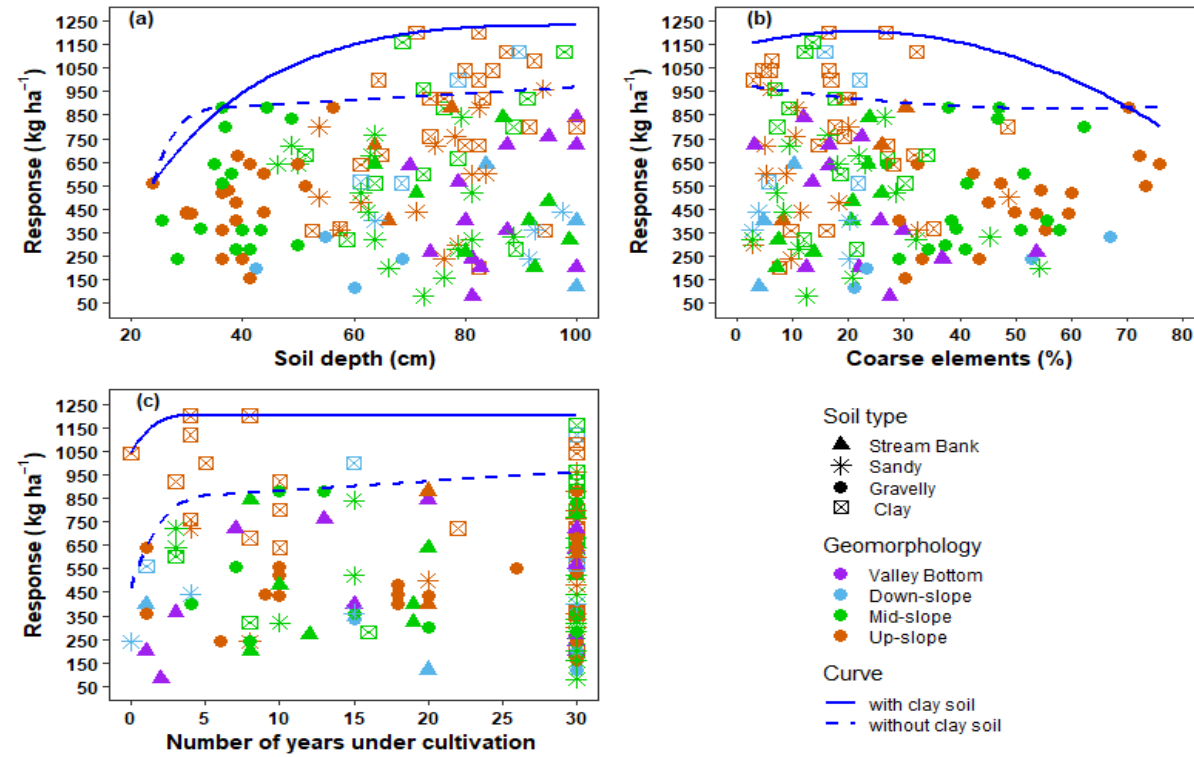


Figure 3.6: Boundary lines for sorghum grain yield response to FM (Δyield) in the Oubritenga province for (a) soil depth, (b) percentage of soil coarse elements, (c) number of years the plot has been under cultivation. Solid lines represent boundary lines for the overall data set, while dashed lines represent boundary lines without the clay soils (see text for explanation).

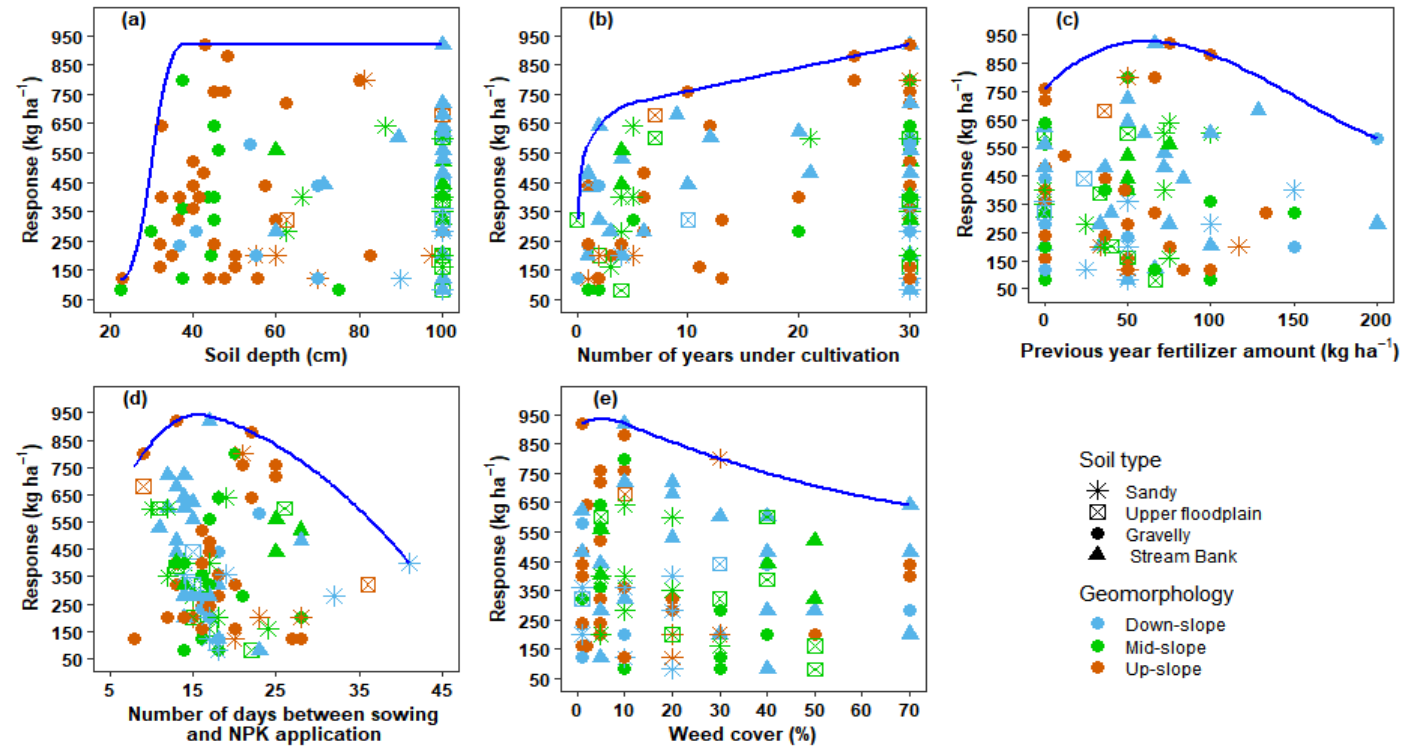


Figure 3.7: Boundary lines for sorghum grain yield response to FM (Δ yield) in Zandoma province for (a) soil depth, (b) number of years the plot has been under cultivation, (c) previous crop fertilizer amount, (d) Number of days between sowing and NPK application, (e) weed cover.

3.4. Discussion

3.4.1. Factors of variability in sorghum response to fertilizer microdosing

Yields in the control and FM treatments followed the increase of mean annual rainfall across the agro-climatic gradient (Figure 3.2). This is likely the result from better nutrient use as water availability increases (Buerkert et al., 2002; Tabo et al., 2011; Tonitto and Ricker-Gilbert 2016) and also of differences in overall soil quality between the provinces. Indeed, Sissili and Oubritenga benefit from the presence of more fertile soils, i.e., black and clay soils, respectively (Table 3.1). In addition, the duration of plot cultivation is lower overall in Sissili (Table 3.2). The higher yields observed in the FM plots compared to the controls resulted from better plant survival in the FM plots and also from the formation of bigger ears in these plots (Figure B.1 and B.2, Appendix B). FM boosts root development of the plants (Ibrahim et al., 2014). As a result, the plants are more vigorous and better able to withstand potential physiological stresses, which include water deficits or excesses.

Although mean yield responses are comparable in Sissili and Zandoma (Figure 3.2), the variability is higher in Sissili (CV=73% in Sissili and 56% in Zandoma). The variability in response to FM found across provinces further emphasizes the need to address variability in crop response to agricultural technology as part of scaling up processes in sub-Saharan Africa (Vanlauwe et al., 2016; Falconnier et al., 2016). The higher variability in sorghum yield response in the Sissili province reflects the greater heterogeneity in cropping system factors in this

province, in particular the greater range in the duration of cultivation of the plots and in previous fertilizer application rates. In Sissili and Oubritenga, the response to FM tends to increase, on average, with increasing productivity of the control plots up to a certain threshold yield of control plot, where the response to FM begins to decrease (Figure 3.2). This general relationship is also observable in the data published by Biolders et al. (2015) and was partly observed by Tovihoudji et al. (2019) who found a trend of decreasing FM responses with increasing yields in control plots. This observation is consistent to what is classically observable in terms of a crop's response to fertilizer application, namely that the yield gains due to the application of a given amount of fertilizer decreases at a certain level of soil fertility (Caldwell et al., 2002; Vanlauwe et al., 2011; Gram et al., 2020; Serme et al., 2020).

As generally stated by Tittonell et al. (2007), the factors that determine variability in response to FM in this study were soil characteristics (soil type, topographical position, depth), plot history (duration of cultivation, previous crops and fertilizer amount), and trial management factors (weed cover, timing of cropping operations). The relative importance of these factors and the processes underlying this variability were, however, quite specific for each agro-climatic zone.

In the Oubritenga province, the best responses are mostly observed on clay soils (Table 3.4, Figure 3.6). These soils likely correspond to Vertisols or Vertic Cambisols in the WRB classification (Table 3.1) and are known as being inherently fertile (Casenave and Valentin, 1989; Kissou et al., 2018) compared to other cultivated soil types present in the province. Inherent fertility encompasses the chemical, physical and

biological fertility resulting from soil parent material, depth, texture, etc., excluding the human-induced changes. In Sissili, the best responses were found on black soils (Table 3.3, Figure 3.5). According to Sissili farmers, black soils are inherently the most fertile in this area (Table 3.1). In the cotton zone of Mali with similar climatic conditions to Sissili, Falconnier et al. (2016) highlighted that black soils (as defined by farmers) had the best SOC and nutrient contents. Finally, in Zandoma, the best responses were found on stream bank soils (Table 3.5, Figure 3.7). Under the low rainfall conditions of Zandoma, stream bank soils are less prone to drought (Table 3.1) and are appreciated by farmers. Due to their low topographic position, these soils benefit from the water, nutrient and organic matter inflows from upstream (Phiri et al., 1999; Rockström et al., 1999; Kissou et al., 2018). The highest responses to FM in each province were thus observed on soil types that are known to be inherently the most fertile there. This suggests that a certain threshold of inherent soil fertility is required in order to achieve the potential of FM response. Ibrahim et al. (2014) and Tovihoudji et al. (2017) have shown that by stimulating crop development, FM results in greater nutrient uptake by crops than what is provided through FM fertilization. Hence, a strong response to FM implies an additional uptake of soil nutrients. By being capable of providing these additional nutrients as well as better moisture conditions, such soils with better inherent fertility levels may thus boost the response to FM.

In terms of topographic position, the best responses were observed on plots at mid- and up-slope positions in Oubritenga and Sissili (Table 3.3 and 3.4). In Oubritenga, this is due to the fact that clay soils, which are the soils with the best responses to FM, are mostly located in the

up-slope and mid-slope positions (Figure 3.6a). In Sissili, this result is the combined effect of two processes. On the one hand, when we consider stony-gravelly soils and gravelly soils, we observe that the best responses of these types of soils are found in the mid-slope position where these soils are deeper and with less coarse elements (Figure 3.5a and 3.5b). On the other hand, unlike those in the mid- and up-slope positions, some black and sandy soils located in the valley bottom or down-slope position in the Sissili province were affected by waterlogging and tended to have lower responses. Thus, the general trend in Sissili was to have better responses on plots at mid- and up-slope positions. In Zandoma, the landform is less rugged without "valley bottom" topographical positions in the study locations (Figure 3.7), unlike in Sissili and Oubritenga (Figure 3.5 and 3.6). The stream bank soils in this province were thus less prone to the waterlogging problem. Indeed, Figure 3.7d shows that better responses were observed on stream bank soils in Zandoma. In summary, it appears that in terms of soil characteristics, the best responses were observed on soil types and topographical positions characterised by good inherent fertility, soil depth and water availability.

In terms of the history of plots, the lowest response potentials were observed in newly cultivated plots (Table 3.5, Figure 3.5c, 3.6c and 3.7b), particularly in the Sissili and Zandoma provinces. In Sissili, newly cultivated plots are plots that were cleared for the first time or after a long period of fallow (Table 3.2). These plots have a better level of fertility (better organic matter and nutrient content) compared to those that have been under cultivation for a long time (Serpantié and Ouattara, 2001; Samaké et al., 2005). Thus, on average, control yields

of plots with duration of cultivation ≤ 5 years were high (1267 kg ha⁻¹), and in the same range as FM yields of plots with duration of cultivation > 10 years (Sissili; Figure B.3, Appendix B). In such situations where soil productivity levels are already high, the potential of plots to respond to small amounts of fertilizer as in FM would be low (Vanlauwe et al., 2016; Amouzou et al., 2018; Tovihoudji et al., 2019).

In contrast to Sissili, the low response from newly recultivated plots in Zandoma is not likely to be the result from a high fertility status. In fact, in this province, there is high pressure on the land, with fewer opportunities to fallow (Table 3.2). Furthermore, based on our data, it was observed that if we consider only plots with recultivation durations ≤ 10 years, the lowest yield levels (control and FM) are observed on plots with fallow durations < 10 years (data not shown). In these low-input, almost continuous cropping systems, the impact of short-duration fallowing in terms of soil fertility restoration is low, especially on sandy or gravelly ferruginous soils (Roose, 1993; Serpantié and Ouattara, 2001). In contrast, plots under continuous cropping may benefit from the cumulative residual effects of applied nutrients such as phosphorus (Coulibaly et al., 2012) and/or be less encrusted due to repeated tillage (Ambouta et al., 1996). As a result, continuously cropped plots with systematic application of small amounts of fertilizer such as those observed on sorghum plots in Zandoma may have better responses to FM than plots newly recultivated after a short fallow whose fertility level may be too low (Kurwakumire et al., 2014). To a lesser extent, this process could also explain the tendency to have low yield response potentials on newly recultivated plots in Oubritenga when clay soils are excluded from the dataset (Figure 3.6c). This trend is not as apparent as

in Zandoma, probably because fertilizer is not systematically applied to sorghum plots in this province.

Still in relation to the history of plots, analysis of yield response as a function of residual effects of prior cropping practices in Sissili and Zandoma showed that response was better on plots benefitting from the residual effects of previous year fertilization or legume crop. Yield response tended to first increase with the amount of fertilizer applied in the previous year, then drop for plots previously amended with the highest amounts of fertilizer (Table 3.3, Figure 3.7c). All else being equal, it is likely that plot fertility and yield response potential to FM increase with the magnitude of the fertilizer and legume residual effects, up to a given level of fertility at which point the potential response to nutrient supply by FM starts decreasing (Vanlauwe et al., 2002a; Kihara et al., 2010). This is similar to the situation of newly cleared plots described above for the Sissili province. This relationship is also reflected in the “soil type” x “previous fertilizer amount” interaction observed in the Oubritenga province, where it was found that the effect of previous fertilizer amount on yield response increase is lower on soils considered more fertile, such as clays soils (Table 3.4).

The variable “distance from homesteads” was not identified as a determinant factor of FM response, contrary to what might have been expected (Vanlauwe et al., 2006; Tittonell et al., 2007). This could be due to a predominant effect of the "duration of plot cultivation" variable over the "distance of plots from homesteads" variable. Indeed, particularly in the Sissili province, newly cultivated plots generally corresponded to the plots that were the most remote from homesteads. In addition, it should also be noted that as the population increases, new

households are increasingly settling around existing homesteads, resulting in a trend toward a decrease in the proportion of "homestead plots". Thus, from our field observations, we did not find noticeable differences in the physiognomy of crops according to the distance of the plots from the farmers' homesteads. This suggests that the distance-related gradient in plot fertility is no longer as steep in these areas as was reported earlier by Prudencio (1993), or as observed in other regions in the sub-Saharan Africa (Vanlauwe et al., 2014).

The FM response levels obtained in Sissili and Zandoma provinces were strongly affected by the management of trial plots. The best responses were obtained when the timing of fertilizer application and weed control operations was respected (Table 3.3 and 3.5, and Figure 3.5 and 3.7). The trend of increasing response observed in Zandoma with delayed seeding results from the fact that delayed seeding significantly reduces yield in control plots ($t = -2.03$, $P = 0.045$) whereas this reduction is not significant in FM plots ($t = -1.21$, $P = 0.227$), something that was also observed by Biolders et al. (2015) in Niger. The importance of plot management on crop response to agricultural technologies has also been noted by authors who have analyzed variability (Fermont et al., 2009; Ronner et al., 2015). In Oubritenga, where plot management guidelines were better followed by the participating farmers (Table 3.2), plot management was not found to determine crop response. This overall better management of the plots and the occurrence of clay soils with high yield response potential to FM, could explain the fact that more than 50% of the plots in this province achieved a $VCR \geq 2$, compared to only about 30% in Sissili and Zandoma (Figure 3.4).

Overall, the dynamics of sorghum response to FM highlighted in our study refers to the idea of response classes formulated by Vanlauwe et al. (2010), and illustrated by Kihara et al. (2016) for fertilization in general. Thus, the response curve to FM as a function of plot fertility can be seen as a bell-shaped curve with three zones: (i) an initial zone of low response to FM due to major constraints that may be, among others, those identified in this study, namely shallow soil and/or high coarse element content, waterlogging problems, high weed pressure, or too low initial fertility; (ii) a central zone that corresponds to plots with intermediate fertility, where the nutrients provided by FM stimulate plant development and provide a significant yield gain, as observed on average on black (Sissili), clay (Oubritenga) and stream bank (Zandoma) soils but also on plots having benefitted from the residuals effects of legume crops or moderate prior fertilization; (iii) and finally a zone beyond a given fertility threshold, where the yield gain due to FM is low because of the already relatively high yield levels on these plots without FM. This corresponds for instance to the newly cultivated plots in Sissili or to plots having benefitted from large prior fertilization rates.

3.4.2. Recommendation domains for better sorghum response to fertilizer microdosing

The above results allow highlighting domains for which better responses to FM can be observed. The response domains are determined by the inherent fertility of the soils, the duration of cultivation of the plots, and the residual effect of previous fertilizer applications or previous legume crops. Based on the different response factors identified, two levels of recommendations can be drawn: general

recommendations applicable across the three provinces, and specific recommendations for each province. General recommendations are as follows: to benefit from the full potential of FM response, good weed control is required. NPK fertilizer should be applied at around 15 DAS and urea at around 45 DAS after weed control operations. In addition, FM should not be applied on shallow soils (< 40 cm).

Specifically for the Sissili province, the recommendation is to avoid applying FM to plots that were cleared less than 5 years ago and/or plots that received high amounts of fertilizer ($> 300 \text{ kg ha}^{-1}$) the previous year. By extension, FM should probably be avoided on plots that received high amounts of organic amendments previously, on which large residual effects are to be expected. In terms of soil type, FM applications should be applied in priority on black soils, and next on gravelly soils. At locations where black soils and/or sandy soils are present, one should avoid applying FM to plots located in valley bottom or down-slope positions that are prone to waterlogging. Plots on which previous legume haulms have been buried are to be prioritized over plots where no fertilizer was previously applied. In the Oubritenga province, FM should be focused first on clays soils. For sandy soils and stream bank soils, priority should be given to plots in more elevated positions that are less prone to waterlogging problems. For Zandoma, the rule is to avoid applying FM to plots that are newly recultivated (<5 years) and have not been fallowed for more than 10 years. In terms of soils, FM should be applied on stream bank soils and secondarily on upper floodplain soils. To achieve the best response potential, FM should be applied on plots with previous fertilizer applications in the range of 50 to 100 kg ha^{-1} .

These recommendations are valid for the current operating conditions of the cropping systems in the study zones and refer to situations where FM is applied without being combined with other agricultural technologies. For example, the recommendation related to the positive effect of the previous legume is only relevant in Sissili, where early groundnut haulms are sometimes buried on plots. In situations where legume haulms are exported from plots, as is commonly practiced in Oubritenga and Zandoma, positive residual effects of the legume are not to be expected (Vanlauwe and Giller, 2006).

3.4.3. Challenges in better understanding response variability

The proportion of variability in FM response captured by the linear models was 29% for Sissili and Oubritenga province, and 12% for Zandoma. These explained variances remain low, similar to the explained proportions of 14% and 25% reported for FM by Biielders et al. (2015) and Tovihoudji et al. (2019), respectively. Nonlinear model fitting did not improve the proportion of variance explained. In contrast, boundary lines improved the understanding of response variability by highlighting factors not identified by linear regressions. Beyond the limitations of the analysis methods used (Shatar and Mcbratney, 2004; James et al., 2013), the large proportion of unexplained variance likely results from insufficient characterization of environmental heterogeneity. In particular, plot history was captured through farmer surveys but farm management characteristics are not recorded by farmers. As a result, it has been difficult, for example, to accurately assess the amounts of fertilizer previously applied and the areas on which these fertilizers were applied. In addition, the dynamics of plot transfer between farmers and the complexity of crop rotations often

encountered on small areas do not always allow for accurate determination of the duration of cultivation of plots and/or clear identification of previous cropping practices. Besides, within the same soil type, there may be differences in microtopography or inherent fertility. In Sissili, for example, it can be noted that the "black soil" class is less homogeneous than other indigenous soil types and may correspond to Gleysols, Vertic Cambisols or Vertisols in the WRB classification (Table 3.1). Thus, the intrinsic fertility levels of the plots may have been only partially captured.

In addition, there are possible complex interactions between factors that cannot be analyzed properly given the size of the dataset. Including physical and chemical parameters from soil analyses would probably have improved the explained variance (Fermont et al., 2009, Ronner et al., 2015). However, soil testing is still largely out of reach for the small-holder farmers targeted by the FM technology, which would make the resulting recommendations less relevant. The main advantage of this analysis is that the results can easily be understood by farmers.

3.5. Conclusions

Field trials were conducted in Burkina Faso in three provinces following the south-north agro-climatic gradient of the country, allowing to highlight biophysical and management domains where better responses to FM are observed. These domains are on the one hand related to the quality of weeding and the timeliness of weeding and fertilization, factors that are equally applicable to all provinces. On the other hand, soil types, duration of plot cultivation, and residual effects of previous cropping practices also affect crop response to FM. Because

the provinces differ in terms of soil types, cropping systems and land pressure, the latter factors are largely specific to each province, thereby justifying the need for site-specific studies.

In each province, the highest levels of response were observed on the soil types recognized as having a good inherent fertility. These are black soils, clay soils, and stream bank soils in the Sissili, Oubritenga, and Zandoma provinces, respectively. However, beyond the fertility levels inherent to the soil types, FM response levels dropped in situations where plots were newly cleared or had benefited from large previous fertilizer applications. Responses also tended to be better on soils that were not shallow (depth > 40 cm) and located in topographic positions where they are less prone to waterlogging problems. Based on the factors determining yield response, site-specific recommendations were formulated to reduce the risk of low response incurred by farmers in the application of FM. However, an important part of the variability of response to FM remains unexplained. Thus, the question of how to better explain response variability and refine the recommendation domains remains an issue for further investigation.

Chapitre 4

L'apport d'amendements organiques permet-il d'améliorer le gain de rendement dû au microdosage d'engrais ? Cas du sorgho dans les petites exploitations familiales du Burkina Faso.

Ouedraogo, Y., Taonda, JB. S., Sermé, I., Tychon, B., Cornelis, J-T., & Biielders, C. L. (2022). Do organic amendments improve sorghum yield response to fertilizer microdosing on smallholder farms in Burkina Faso?
In progress

4.1. Introduction

La faible fertilité inhérente des sols et la faiblesse des restitutions en nutriments dans les systèmes agricoles en Afrique subsaharienne (ASS) se traduisent par de faibles niveaux de production et la dégradation de la fertilité des sols (Sanchez, 2002; Chianu et al., 2012). Les faibles apports d'engrais sont particulièrement marqués chez les petits producteurs céréaliers (Waddington et al., 2010; Van der Velde et al., 2013). Pour inciter ces petits producteurs à utiliser l'engrais, la technique de la fertilisation microdose a été développée (Buerkert et al., 2001; Twomlow et al., 2006). Celle-ci consiste en l'apport localisé de petites quantités d'engrais (2 à 6g/poquet) aux pieds des plants. L'idée derrière cette approche de fertilisation est que les petites quantités d'engrais sont plus accessibles financièrement par les producteurs avec peu de ressources, et permettent de maximiser le gain de rendement et de revenu par unité d'engrais (Aune et al., 2012). De nombreux travaux réalisés sur la FM en station (Muehlig-versen et al., 2003; Hayashi et al., 2008 ; Pale et al., 2009 ; Bagayoko et al., 2011 ; Ibrahim et al., 2014) et en milieu paysan (Aune et al., 2007 ; Tabo et al., 2011 ; Twomlow et al., 2010; Biielders and Gérard, 2015) ont montré que la FM stimule le développement rapide des plants (aspect crucial en zone semi-aride) et améliore considérablement les rendements des petits producteurs. Il en résulte alors une amélioration de la sécurité alimentaire des familles (Murendo and Wollni, 2015).

Cependant, une forte variabilité de la réponse des cultures aux apports d'engrais a souvent été rapportée en ASS (Chikowo et al., 2010 ; Kihara et al., 2016 ; Roobroeck et al., 2021). Cette variabilité constitue une contrainte majeure à la promotion de la FM, car elle pose la question du

risque de non-retour sur investissement de l'application de l'engrais. Dans le cas spécifique de la fertilisation microdose, la variabilité de la réponse a été analysée par plusieurs auteurs dans différents contextes climatiques et systèmes de culture (Buerkert et al., 2002 ; Biielders and Gérard, 2015 ; Tovihoudji et al., 2019) et aussi dans le cadre de cette thèse (chapitre 2 et 3). Ces études ont mis en exergue différents facteurs biophysiques (p.ex., type de sol, climat), d'historiques et de gestion des parcelles (p.ex., timing et qualité du sarclage, apports antécédents de fertilisants) affectant la réponse de la FM. Dans le contexte du Burkina Faso, nos travaux ont montré que les meilleures réponses à la FM avaient tendance à être observées sur les sols avec les meilleurs niveaux de fertilité inhérente (Chapitre 3). Cette tendance à observer les meilleures réponses sur les sols présentant un bon niveau de fertilité inhérente renvoie à l'inquiétude sur la durabilité de la pratique de la FM, soulevée par plusieurs auteurs (Camara et al., 2013 ; Ibrahim et al., 2016 ; Tovihoudji et al., 2017). En effet, ces auteurs indiquent qu'en stimulant le développement des cultures, la FM entraîne un prélèvement de nutriment plus important que ce qu'elle apporte, et augmente ainsi le risque de déplétion des nutriments du sol. Cette inquiétude est tempérée par une étude à long terme (16 ans) de Adams et al. (2016) qui indique que la déplétion en nutriment attribué à la FM reste cependant moindre que la pratique sans engrais des producteurs. Par ailleurs, ces auteurs recommandent d'associer la FM à l'épandage de fumier ou à des résidus de culture. En effet, ils ont montré que ces combinaisons améliorent la durabilité du système (en tamponnant le pH, en améliorant la teneur totale en P et apportant d'autres nutriments essentiels non contenus dans les engrais).

C'est dans cette vision de recherche de durabilité que la pratique de gestion intégrée de la fertilité des sols (GIFS) par l'association des engrais minéraux aux amendements organiques est encouragée en ASS, avec pour objectif de maximiser les interactions positives (Vanlauwe et al., 2001; Chivenge et al., 2011 ; Vanlauwe et al., 2015). En effet, si pour des sols de type « *responsive* » l'application de l'engrais seul peut donner des gains de rendement élevés, pour des sols pauvres et/ou présentant certaines limitations (sol sableux, de faible profondeur ou dégradés), l'association de l'engrais avec des amendements organiques peut s'avérer nécessaire pour obtenir de bonnes de réponses (Zingore et al., 2008 ; Sanginga and Woomer, 2009). Vanlauwe et al. (2011) ont trouvé que l'association de l'engrais avec du fumier, du compost ou plus généralement avec des ressources organiques de qualité intermédiaire (%N > 2,5 ; % lignine > 15% et phénol > 4%) conduit à une amélioration de l'efficacité agronomique de l'azote (gain de rendement par unité d'azote). Cependant, Akponikpè et al. (2008) et Chivenge et al. (2011) ont rapporté que de faibles efficacités agronomiques des nutriments peuvent être observées lorsqu'on combine des engrais et des amendements organiques, surtout lorsque la combinaison implique des quantités élevées. Ainsi, ces auteurs soulignent la nécessité d'associer de petites doses des deux amendements pour espérer des interactions positives.

Concernant la FM, les différentes études qui se sont intéressées à l'association de la FM avec les amendements organiques se sont focalisées sur le rendement total obtenu par l'association FM + amendements organiques (Ibrahim et al., 2015a ; Somda et al., 2017 ; Tovihoudji et al., 2019), sans porter une attention aux éventuelles

interactions (synergie ou dépression) pouvant résulter. En termes d'interaction, Tovihoudji et al. (2017) ont observé qu'en combinaison avec des amendements organiques, le gain rendement dû à la FM tend à diminuer. Cette tendance à la réduction de la réponse de la FM en association avec des amendements organiques a aussi été mise en exergue par la méta-analyse réalisée par Ouedraogo et al. (2020). L'étude de Tovihoudji et al. (2017) a été conduite en condition contrôlée de station ; et les amendements organiques dans la méta-analyse de Ouedraogo et al. (2020) regroupaient différentes quantités et qualités de fumier et de compost. Dans ces conditions, les éventuelles interactions synergiques auraient bien pu ne pas être mises en évidence. En effet, comme le souligne Vanlauwe et al. (2011), des analyses qui prennent en compte les effets des facteurs de variabilité rencontrés dans les systèmes de cultures sont nécessaires pour identifier les situations spécifiques des parcelles où les meilleures efficiences agronomiques des amendements sont observées.

Dans la recherche des interactions positives entre engrais et amendements organiques, et partant du constat des difficultés qu'éprouvent les producteurs à disposer en quantité suffisante des amendements organiques les plus courants que sont le compost et/ou le fumier, des pratiques de GIFS consistant en des combinaisons d'engrais et de biochars sont aussi de plus en plus testées en ASS (Graef et al., 2018 ; Kätterer et al., 2019 ; Kamau et al., 2019 ; Cissé et al., 2021). Le biochar est un amendement organique issu de la combustion incomplète de matériaux végétaux. Il permet entre autres d'améliorer la capacité de rétention en eau et la capacité d'échange cationique (CEC) du sol, et de relever le pH. Ainsi, dans la dynamique de l'analyse de la variabilité et

de l'identification des domaines de bonne réponse de la FM, cette étude vise à répondre aux questions suivantes : (i) dans le contexte des petites exploitations agricoles du Burkina Faso, dans quelles conditions peut-on observer des effets synergiques entre la FM et l'apport de compost ou de biochar ? ; et (ii) quelles sont les facteurs biophysiques ou de gestion pouvant affecter cette synergie ?

4.2. Matériels et méthodes

4.2.1. Zone d'étude

L'étude a été conduite dans 3 provinces du Burkina Faso suivant le gradient agro-climatique sud-nord du pays. Il s'agit de la province de la Sissili, de l'Ouhritenga et du Zandoma (Figure 1.3). Les zones d'étude ont été décrites en détail dans la section 1.4 du chapitre 1.

4.2.2. Mise en place de l'essai

4.2.2.1. Identification des parcelles d'essai

Les essais de stratégies complémentaires à la FM ont été conduits en 2019 et 2020. Pour chaque province, ces essais ont été conduits sur 30 parcelles en 2019 et 45 parcelles en 2020, soit un total de 225 parcelles sur les deux ans pour les trois provinces. Pour des raisons d'ordre pratique, l'essai de stratégies complémentaires de 2019 a été réalisé concomitamment sur 30 des 75 parcelles utilisées pour l'essai visant à déterminer les facteurs de variabilité de 2019 (Tableau C.1, Annexe C).

La démarche d'identification des parcelles a été détaillée à la section 3.2.2.1 du chapitre 3. Des pertes relativement importantes de parcelles d'essais ont été observées pour l'essai de variabilité en 2018 pour

diverses raisons (non-respect du dispositif, non-désherbage, dégât par des d'animaux, etc.). Ainsi, dans le souci d'avoir chaque année un nombre suffisant de parcelles (≥ 5 parcelles) pour chaque combinaison sol x distance pour les essais de stratégies complémentaires, les sols de type "*stony-gravelly*" et "les parcelles de case" n'ont pas été prises en compte dans ces essais. Ce choix a été guidé par les hypothèses suivantes : (i) les "parcelles de case" présenteraient déjà des teneurs plus élevées en matière organique (Prudencio, 1993), alors que l'essai de stratégies complémentaires est basé sur l'association de la FM avec de petites quantités d'amendements organiques (Tableau 4.2) ; (ii) les caractéristiques des sols de type « *stony-gravelly* » peuvent dans une certaine mesure être rencontrées sur les sols de type « *gravelly* » (Tableau 3.1).

4.2.2.2. Description des traitements et du dispositif expérimental

Les amendements susceptibles d'améliorer l'effet de la microdose ont été identifiées au cours d'une séance de réflexion de la cellule d'innovation du projet Microferti. Cette cellule d'innovation était composée de chercheurs de l'Institut de l'Environnement et de Recherches Agricoles (INERA) du Burkina Faso, de chercheurs de l'Université de Nazi Boni (UNB), de chercheurs internationaux et des représentants des organisations de producteurs partenaires au projet.

Pour faciliter la prise en main par les producteurs des éventuelles stratégies qui pourraient être recommandées à l'issue des essais, la cellule d'innovation a opté pour : (i) des amendements déjà pratiqués et bien connus des producteurs que sont le compost et le co-compost Burkina phosphate (compost-BP ; CILSS, 2016) ; (ii) et un

amendement (le biochar) qui permettrait de valoriser des résidus de culture ou de végétaux encore peu exploités par les producteurs. Il a été décidé de produire le compost et le compost-BP avec des tiges de sorgho, de mil et/ou de maïs. En tenant compte de la disponibilité des matériaux dans chaque province, le choix a été fait de produire le biochar avec des tiges de coton dans la Sissili, des rachis de maïs dans l'Oubritenga, et des gousses de *Piliostigma sp* dans le Zandoma.

La FM classique (NPK 14-23-14 + urée 46 %N) apporte par hectare environ 23 kg de N, 6 kg de P et 7 kg de K (Tableau 4.3). En zone de faible pluviométrie en Afrique de l'Ouest, le P apparaît comme le nutriment le plus limitant, alors que le N tend à devenir plus limitant dans les zones plus pluvieuses (Buerkert and Schlecht, 2013). Ainsi, le co-compost Burkina phosphate (compost-BP), qui est un compost enrichi en phosphate naturel lors du compostage, a été retenu comme de stratégie complémentaire à la FM dans les provinces de l'Oubritenga et du Zandoma. Dans la Sissili, zone plus pluvieuse (800-1000 mm/an) où le P est a priori moins limitant que le N, le compost enrichi en phosphore (compost-BP) a été remplacé par un traitement FM2 (NPK 23-10-05 + urée 46 %N) qui apporte plus de N, mais moins de P et de K (29 kg de N ha⁻¹, 3 kg de P ha⁻¹ et 3 kg de K ha⁻¹ ; Tableau 4.3), que la FM classique.

Au final, l'essai de stratégies complémentaires était donc composé de 7 traitements dans la province de la Sissili et de 8 traitements dans l'Oubritenga et le Zandoma (Tableau 4.1). Chaque traitement a consisté en une parcelle de 300 m², soit une superficie totale de 2100 m² dans la Sissili et 2400 m² dans l'Oubritenga et le Zandoma (Figure C.1a et C.1b, Annexe C). Les modes d'application des différents traitements

sont renseignés dans le tableau 4.2. En dehors des modifications introduites par les nouveaux traitements (traitement de stratégies complémentaires), l'itinéraire technique minimum convenu pour être appliqué par les producteurs sur les parcelles a été identique à celui de l'essai d'analyse de la variabilité (chapitre 3, section 3.2.2.2).

Les quantités de compost et de compost-BP testées en combinaison avec la FM ont été de 1250 kg ha^{-1} , soit la moitié de la quantité de $2,5 \text{ t/ha/an}$ classiquement recommandée par la recherche au Burkina Faso. Ces amendements organiques ont été appliqués au poquet pendant le semis. Avec une densité de semis recommandée de 31250 poquets/ha pour le sorgho, cela correspond à 40 g de compost ou de compost-BP/poquet (Tableau 4.2). Le recours à de petites doses d'amendements organiques en combinaison avec la FM se justifie par le fait qu'on cherche à maximiser l'efficacité agronomique des nutriments fournis par les deux types d'amendements (Sanginga and Woomer, 2009; Chivenge et al., 2011). Cela est d'autant plus pertinent dans la mesure où les quantités d'amendements organiques et d'engrais habituellement appliquées par les producteurs restent en dessous des recommandations de la recherche (MAAH, 2020).

En 2019, la production du compost et du compost enrichi en Burkina Phosphate (compost-BP) a été effectuée par des représentants des producteurs expérimentateurs. Pour des raisons d'organisation, ces amendements n'ont pas pu être produits par ces mêmes acteurs en 2020 et ont été achetés auprès d'associations de producteurs. Ainsi, les teneurs en nutriments, principalement les teneurs en K pour le compost des trois provinces, les teneurs en P pour le compost de l'Oubritenga et

Tableau 4.1: Traitements de l'essai de stratégies complémentaires et les hypothèses ayant motivé le choix des traitements.

N°	Sissili	Oubritenga	Zandoma	Justification du choix de la stratégie
1	Témoin	Témoin	Témoin	-
2	FM	FM	FM	-
3	Biochar de tige de coton	Biochar rachis de maïs	Biochar gousse de <i>Piliostigma sp</i>	Amélioration de l'humidité du sol, apport de potassium et augmentation du pH
4	Biochar macéré de tige de coton	Biochar macéré de rachis de maïs	Biochar macéré de gousse de <i>Piliostigma sp</i>	- Amélioration de l'humidité du sol et apport de potassium - <i>Slow release</i> des nutriments de l'engrais par le biochar macéré (possible synergie avec l'engrais en microdosage)
5	Compost	Compost	Compost	Amélioration de l'humidité du sol et apports de nutriments
6	Compost + FM	Compost + FM	Compost + FM	- Amélioration de l'humidité du sol et apports de nutriments complémentaires à l'engrais (possible synergie avec la FM)

	Sissili	Oubritenga	Zandoma	Justification du choix de la stratégie
7	FM2 (NPK 23-10-05)	Compost-BP	Compost-BP	<u>Compost-BP :</u> - Amélioration de l'humidité du sol et apports de nutriments - Apport supplémentaire de phosphore, reconnu comme nutriment le plus limitant en zone de faible pluviométrie <u>FM2 (NPK 23-10-05) :</u> - Apport supplémentaire d'azote, reconnu comme nutriment plus limitant en zone de pluviométrie élevée
	-	Compost-BP + FM	Compost-BP + FM	- Amélioration de l'humidité du sol et apports de nutriments complémentaires à l'engrais - Apport supplémentaire de phosphore, reconnu comme nutriment le plus limitant en zone de faible pluviométrie (possible synergie avec la FM)

FM = fertilisation microdose (engrais NPK 14-23-14), FM2 = fertilisation microdose (engrais NPK 23-10-05),
 Compost-BP = co-compost avec du Burkina phosphate, Biochar = produit de la combustion incomplète de matériaux végétaux,
 Biochar macéré = Biochar imbibé d'une solution aqueuse d'engrais (NPK 14-23-14).

Tableau 4.2: Modes d'application des différents traitements de l'essai de stratégie complémentaire.

Traitements	Mode d'application
Témoin	- Pas d'apport d'engrais, ni d'amendement organique
FM	- Appliquer 2 g de NPK (14-23-14)/poquet ¹ 15 jours après semis et 1 g d'urée (46% N)/poquet 45 jours après semis
FM2	- Appliquer 2 g de NPK (23-10-05)/poquet 15 jours après semis et 1 g d'urée (46% N) /poquet 45 jours après semis
Compost	- Appliquer 40 g de compost/poquet au semis
Compost + FM	- Appliquer 40 g de compost/poquet au semis - Appliquer 2 g de NPK (14-23-14)/poquet 15 jours après semis et 1 g d'urée (46% N)/poquet 45 jours après semis
Compost-BP	- Appliquer 40 g de compost-BP/poquet au semis
Compost-BP + FM	- Appliquer 40 g de compost-BP/poquet au semis - Appliquer 2 g de NPK (14-23-14)/poquet 15 jours après semis et 1 g d'urée (46% N)/poquet 45 jours après semis
Biochar	- Appliquer 2 g de biochar /poquet 15 jours après semis
Biochar macéré	- Appliquer 5 g de biochar macéré /poquet 15 jours après semis et 1 g d'urée (46% N)/poquet 45 jours après semis

¹ La densité de semis recommandée pour le sorgho est de 31250 poquets/ha. La FM ou FM2 apporte donc 62.5 kg ha⁻¹ de NPK et 31.25 kg ha⁻¹ d'urée.

les teneurs en P du compost-BP du Zandoma ont sensiblement varié d'une année à l'autre (Tableau 4.3, Tableau C.2 en Annexe C).

Le biochar macéré avec de l'engrais a été appliqué comme stratégie complémentaire avec l'idée d'obtenir un effet *slow release* des nutriments par le biochar (Kim et al., 2014; Zhao et al., 2016). La macération du biochar a consisté à imbiber le biochar pendant 48 heures dans une solution aqueuse d'engrais N-P-K (14-23-14) avec un rapport massique biochar/engrais de 1/1. Le volume d'eau de la solution aqueuse a été calculé en fonction de la capacité d'absorption en eau du biochar afin d'assurer une absorption totale de la solution d'engrais par le biochar. Le biochar ainsi obtenu après macération et séchage à l'ombre est appelé biochar macéré. La méthodologie de macération est détaillée à l'annexe C. La production du biochar a été réalisée avec l'appui de l'équipe du projet PRD Bioprotechsol¹. La production et le processus de macération ont été effectués dans chaque zone de l'étude avec la participation des producteurs expérimentateurs pour leur permettre de s'approprier la production et la macération du biochar.

La dose d'application de biochar macéré a été déterminée pour apporter des quantités de nutriments équivalentes à l'engrais N-P-K (14-23-14) de la FM (Tableau 4.3). Avec un rapport massique de macération entre le biochar et l'engrais de 1/1, le rapport massique biochar macéré/biochar simple doit être égal à 2 (après séchage du biochar macéré) si tout l'engrais est absorbé par le biochar. Dans ce cas de

¹ <https://www.ares-ac.be/fr/cooperation-au-developpement/pays-projets/projets-dans-le-monde/item/144-prd-amelioration-durable-de-la-fertilite-des-sols-du-burkina-faso-par-amendement-raisonne-en-matieres-organiques-et-biochar-bioprotechsol>

figure, pour avoir 2 g d'engrais NPK/poquet de sorgho comme recommandé en FM au Burkina Faso, il faudrait apporter 4g de biochar macéré/poquet. Cependant, dans la pratique de macération, nous avons observé que le rapport massique biochar macéré/biochar simple a été de : 1,84 ; 1,81 et 1,78 respectivement pour le biochar de tige de coton, de rachis de maïs et de gousse de *Piliostigma*. Il y a donc eu des pertes d'engrais (non expliquées) lors de la macération. En tenant compte de ces pertes, pour satisfaire la dose de 2g d'engrais NPK/poquet de sorgho, il faudrait appliquer 4,4 g ; 4,5 g et 4,6 g de biochar macérés (au lieu de 4 g), respectivement pour le biochar de tige de coton, de rachis de maïs et de gousse de *Piliostigma*. Pour des raisons d'ordre pratique de facilité d'application à la parcelle par les producteurs, nous avons recommandé d'appliquer 5 g de biochar macéré/poquet de sorgho. Cette quantité correspond après tarage au laboratoire à deux capsules bien pleines de bouteille de Coca-Cola® ou à une prise avec les 5 doigts juste avant les premières lignes des doigts pour un adulte. La quantité de 5g/poquet de biochar macéré correspond à 156,25 kg ha⁻¹. Deux capsules pleines de bouteille de Coca-Cola® pour le biochar simple correspondent à un poids compris entre 2 et 2,5 g. Ainsi, la quantité de biochar simple appliquée a été d'environ 2 g/poquet (~ 62,5 kg ha⁻¹).

Tableau 4.3: Quantité de nutriments N, P et K (kg ha⁻¹) apportée par les différents amendements appliqués.

	Sissili			Oubritenga			Zandoma		
	N	P	K	N	P	K	N	P	K
Fertilizers									
N-P-K (14-23-14)	8,75	6,28	7,29	8,75	6,28	7,29	8,75	6,28	7,29
N-P-K (23-10-05)	14,38	2,73	2,6	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a
Urea (46% N)	14,49	0	0	14,49	0	0	14,49	0	0
Biochars									
Biochar only	0,58	0,18	1,3	0,38	0,08	0,92	1,07	0,27	1,84
Biochar macerated in fertilizer	9,42	7,51	12,18	8,51	4,95	7,46	9,19	6,64	10,93
Organic Amendments									
Compost (year 2019)	13,25	3,27	3,89	12,08	2,69	21,88	14,63	1,67	5,56
Compost + BP (year 2019)	n/a	n/a	n/a	9,69	16,7	18,08	16,81	20,39	17,48
Compost (year 2020)	15,32	3,35	26,13	19,5	8,59	10,02	16,27	2,82	24,10
Compost + BP (year 2020)	n/a	n/a	n/a	11,63	12,85	19,72	10,79	5,96	11,86

n/a = *not applicable*

Compost-BP = co-compost avec du Burkina phosphate

4.2.3. Collecte des données

Les méthodes de collecte des données ont été similaires à celles de l'essai d'analyse de la variabilité (chapitre 3, section 3.2.3).

4.2.4. Analyse des données

Les données ont été vérifiées pour retirer les données des parcelles n'ayant pas respecté le dispositif, non désherbées, détruites par les animaux, détruites par érosion ou inondation. Au total, 56 parcelles ont été analysées pour la Sissili, 69 pour l'Oubritenga et 63 pour le Zandoma. La répartition des données entre les différents types de sols dans chaque province est la suivante. Dans la Sissili, 39% des parcelles ont été des *black soils*, 34 % des *sandy soils* et 27% des *gravelly soils*. Dans l'Oubritenga, l'analyse comprenait 30% de *clay soils*, 25% de *gravelly* et de *sandy soils*, et 20% de *stream bank soils*. Dans le Zandoma, 35% des parcelles analysées étaient des *gravelly soils*, 24% des *stream bank soils*, 19% des *sandy soils* et 22% des *Upper floodplain soils*. Les analyses ont été effectuées par province (zone agro-climatique), avec R version 4.0.4.

L'objectif de l'essai de stratégies complémentaires était de rechercher les conditions biophysiques et de gestions des parcelles pour lesquelles une synergie peut être observée entre la fertilisation microdose et les amendements organiques (compost et biochar) en termes de gain de rendement. Pour cela, les réponses en rendement grain de sorgho liées à la fertilisation microdose des traitements avec fertilisation microdose (microdose appliquée seule ou en combinaison avec les amendements organiques) ont été calculées pour chaque parcelle. La réponse exprime ici le gain de rendement attribuable à la fertilisation microdose. Ainsi,

suivant la province, il a été calculé la réponse : (i) de la FM appliquée seule ($\Delta\text{yield}_{\text{FM}} = \text{Yield FM} - \text{Yield Control}$) ; (ii) de la FM2 appliquée seule ($\Delta\text{yield}_{\text{FM2}} = \text{Yield FM2} - \text{Yield Control}$) ; (iii) de la FM appliquée sous forme de biochar macéré ($\Delta\text{yield}_{\text{Bio+FM}} = \text{Yield Bio+FM} - \text{Yield Bio}$) ; (iv) de la FM en combinaison avec le compost ($\Delta\text{yield}_{\text{C+FM}} = \text{Yield C+FM} - \text{Yield C}$) ; et de la FM en combinaison avec le compost-BP ($\Delta\text{yield}_{\text{CBP+FM}} = \text{Yield CBP+FM} - \text{Yield CBP}$). La réponse (l'effet) de la microdose a été considérée comme la variable à expliquer. La variable qualifiée ici de traitement avec fertilisation microdose (dont les modalités sont : FM, FM2, Bio+FM, C+FM et CBP+FM), les variables biophysiques et les variables de gestion (variable d'historique et de conduite des essais) ont été considérées comme variables explicatives.

Des analyses descriptives par *box plot* et *scatter plot* ont d'abord été effectuées pour apprécier les distributions et les relations entre la réponse et les variables explicatives. Un modèle linéaire mixte a ensuite été utilisé pour analyser la réponse en fonction des variables explicatives. La parcelle d'essai a été considérée comme un facteur aléatoire. La variable traitement avec fertilisation microdose, les variables biophysiques et les variables de gestion des parcelles ont été considérées comme des facteurs fixes.

Le modèle mixte a été construit comme suit :

$$Y_{ijk} = \alpha_i T_i + \beta_j V_j + \delta_{ij} TV_{ij} + \varepsilon_k P_k + R_{ijk}$$

Où Y_{ijk} = la réponse à la microdose pour un traitement avec fertilisation microdose (FM, FM2, Bio+FM, C+FM ou CBP+FM) au niveau d'une

parcelle donnée, T_i = le $i^{\text{ème}}$ niveau du traitement avec fertilisation microdose (FM, FM2, Bio+FM, C+FM ou CBP+FM), V_j = $j^{\text{ème}}$ niveau possible des variables explicatives continues ou catégorielles (variable biophysique ou de gestion ; les niveaux étant ignorés si la variable n'est pas retenue dans le modèle), TV_{ij} = les interactions entre T_i et V_j , P_k = $k^{\text{ème}}$ parcelle d'essai, R_{ijk} = le résidu, α_i , β_j et δ_{ij} représentent les coefficients des effets fixes et ε_k = le coefficient de l'effet aléatoire (effet parcelle).

Les teneurs de certains nutriments du compost et du compost-BP ont sensiblement différencié entre 2019 et 2020 (Tableau 4.3). Cependant, les tests de comparaison de distribution des rendements qui ont été réalisés (test de Kolmogorov-Smirnov) n'ont pas indiqué ($P > 0.05$) que les rendements des différents traitements conduits en 2019 et en 2020 peuvent être considérés comme provenant de différentes populations. Les données des deux années ont donc été regroupées pour les analyses. Avant de rechercher le modèle final, les multicollinéarités ont été explorées en retirant les variables et les interactions qui ont un *variance inflation factor (VIF)* > 10 , tout en tenant compte de la pertinence des variables pour le modèle (package "car"). Le modèle mixte a été réalisé avec le package "lmerTest" et le modèle final a été obtenu par sélection backward avec la commande "step" du même package. Les tableaux d'analyse de variance ont été réalisés avec la fonction Anova par test "Chisq" de Wald (package "car"). Des comparaisons multiples entre les modalités des variables (variable traitement avec fertilisation microdose, variables biophysiques et de gestion) et des interactions ont été effectuées par la méthode "pairwise" avec ajustement de "Sidak"

(package "emmeans"). Les graphes des effets des variables retenues dans le modèle ont été tracés avec le package "effects".

Outre l'analyse de la réponse (effet) de la fertilisation microdose, les rendements totaux des différents traitements (avec et sans fertilisation microdose ; Tableau 4.1) ont été estimés par modèle mixte en considérant la parcelle comme facteur aléatoire, et le traitement et le type de sol comme facteurs fixes. Une comparaison multiple ("*pairwise*") des moyennes des rendements en grain des différents traitements a alors été effectuée, en effectuant l'ajustement de "Sidak". Aussi, en tenant compte des niveaux de prix du sorgho et de l'engrais, les proportions de parcelles pour lesquelles le rapport bénéfice-coût (VCR) est < 1 (seuil de non-profitabilité) et ≥ 2 (seuil favorable à l'adoption) ont été calculées pour les traitements avec fertilisation microdose.

4.3. Résultats

4.3.1. Caractéristiques des parcelles et de la gestion des essais

Les caractéristiques des parcelles analysées et leurs gestions sont indiquées dans le tableau 4.4. Globalement, les parcelles avaient de plus faibles durées de mise en culture dans la province de la Sissili (14 ± 10 ans) que dans les deux autres provinces. Dans la Sissili, les parcelles cultivées avaient été défrichées pour la première fois ou avaient bénéficié de longues durées de jachère (28 ± 5 ans). Dans l'Oubritenga et particulièrement dans le Zandoma, les possibilités de jachères étaient plus limitées, avec des durées moyennes de jachère de 17 ± 12 ans dans l'Oubritenga et 13 ± 11 ans dans le Zandoma. Les précédents apports d'engrais sur les parcelles étaient en moyenne les plus élevés dans la

Sissili ($71 \pm 111 \text{ kg ha}^{-1}$) et les plus faibles dans l'Oubritenga ($9 \pm 22 \text{ kg ha}^{-1}$), avec des valeurs intermédiaires dans le Zandoma ($55 \pm 52 \text{ kg ha}^{-1}$). 69 % des parcelles analysées dans le Zandoma avaient bénéficié d'apport d'engrais l'année ayant précédé les essais. Ce taux était de 34 % dans la Sissili et de 17 % dans l'Oubritenga. Les timings de la réalisation du premier désherbage et de l'apport de l'engrais NPK sur les essais ont été globalement mieux respectés dans l'Oubritenga (respectivement 12 ± 5 et 13 ± 4 jours après semis) que dans les deux autres provinces (Tableau 4.4).

Tableau 4.4: Caractéristiques des parcelles et de la gestion des essais.

	Sissili				Oubritenga				Zandoma			
	Moy ± SD	Min	Méd	Max	Moy ± SD	Min	Méd	Max	Moy ± SD	Min	Méd	Max
Caractéristiques des parcelles												
Profondeur du sol (cm)	66 ± 21	24	65	100	74 ± 18	37	71	100	72 ± 30	27	89	100
Durée de (re-) mise en culture des parcelles (an) ¹	14 ± 10	0	11	30	18 ± 12	0	18	30	16 ± 11	1	13	30
Durée de jachère avant (re-)mise en culture (an) ²	28 ± 5	7	30	30	17 ± 12	3	15	30	13 ± 11	2	7	30
Quantité d'engrais de l'année précédente (kg ha ⁻¹) ³	71 ± 111	0	0	367	9 ± 22	0	0	94	55 ± 52	0	50	200
Gestion des parcelles												
Nombre de jours entre le début de la saison pluvieuse et la date de semis	32 ± 5	21	33	40	15 ± 4	9	14	26	20 ± 5	9	20	29
Nombre de jours entre le semis et le premier désherbage	21 ± 8	10	20	47	12 ± 5	5	12	32	29 ± 7	13	29	46

	Sissili				Oubritenga				Zandoma			
	Moy $\pm$ SD	Min	Méd	Max	Moy $\pm$ SD	Min	Méd	Max	Moy $\pm$ SD	Min	Méd	Max
Gestion des parcelles (suite)												
Nombre de jours entre le semis et l'application de l'engrais NPK	23 $\pm$ 5	14	23	36	13 $\pm$ 4	6	12	34	18 $\pm$ 4	10	17	28
Nombre de jours entre le semis et l'application de l'urée	43 $\pm$ 5	31	42	55	48 $\pm$ 6	37	47	68	43 $\pm$ 8	25	42	66
Incidence de <i>Striga</i>	2 $\pm$ 1	1	2	4	3 $\pm$ 1	1	3	4	2 $\pm$ 1	1	1	4
Enherbement au 75 JAS (%)	27 $\pm$ 18	2	23	70	17 $\pm$ 16	1	10	70	18 $\pm$ 18	1	10	70

JAS = Jour après semis, Moy = moyenne, SD = déviation standard, Min = minimum, Max = maximum, Méd = médiane.

¹ Il était difficile pour les producteurs de fournir des informations remontant trop loin dans le passé. Ainsi, la collecte des informations sur la durée de mise en culture et de jachère des parcelles a été limitée à 30 ans. ² Cette variable a été calculée en considérant uniquement les parcelles avec des durées de mise en culture ≤ 10 ans ; cela correspond à 61%, 38% et 39% des parcelles analysées respectivement dans la Sissili, l'Oubritenga et le Zandoma. ³ Moyenne calculée en considérant toutes les parcelles analysées, y compris les parcelles non fertilisées l'année précédente.

4.3.2. Rendement en grain du sorgho des différents traitements

De manière globale, il est apparu que le niveau de rendement des traitements (avec ou sans FM) a été fonction de la pluviométrie des zones agro-climatiques. Les rendements les plus élevés ont été observés dans la Sissili (800-1000 mm), suivi de l'Oubritenga (600-800 mm), puis du Zandoma (500-600 mm ; Figure 4.1). Dans les trois provinces, les meilleurs rendements ont été observés sur les traitements avec application de la fertilisation microdose. Les rendements les plus élevés ont été obtenus lorsque la FM est combinée avec du compost-BP et dans une moindre mesure avec du compost simple (Figure 4.1). Parmi les traitements avec apport d'engrais, les rendements les moins importants ont été observés pour le biochar macéré. Cette tendance du biochar macéré à mener à des rendements plus faibles que les autres traitements avec engrais a été statistiquement significative dans l'Oubritenga (Figure 4.1b). Sur l'ensemble des traitements, les plus faibles rendements ont été obtenus pour le témoin et l'apport de biochar simple, dont les rendements ne sont pas en moyenne significativement différents l'un de l'autre. Des niveaux intermédiaires de rendements entre ceux des témoins et des traitements avec fertilisation microdose ont été observés pour les traitements de compost et de compost-BP sans d'engrais.

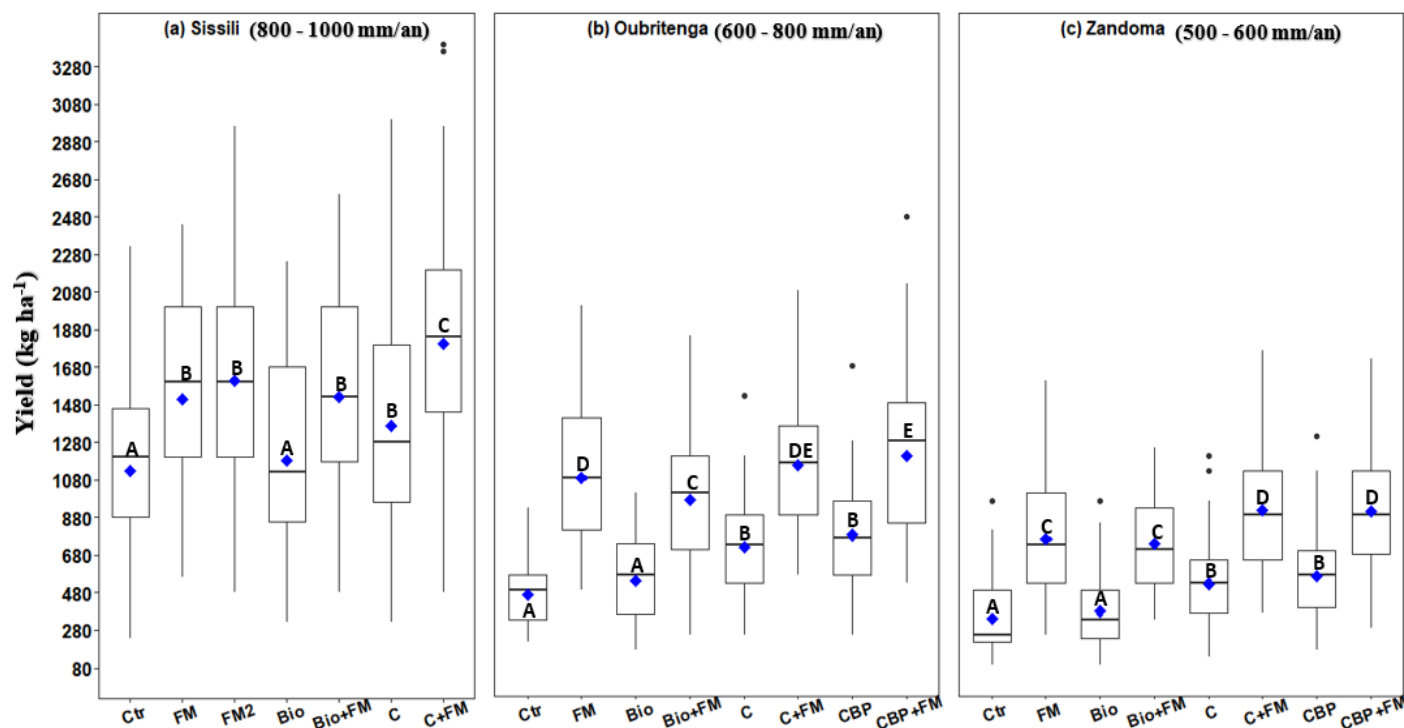


Figure 4.1: Rendement en grain du sorgho des traitements pour chaque province (zone agro-climatique). Les losanges dans les box plots indiquent les rendements moyens de chaque traitement estimés par modèle mixte. Ctr = control, FM = fertilisation microdose (engrais NPK 14-23-14), FM2 = fertilisation microdose (engrais NPK 23-10-05), Bio = biochar, Bio + FM = biochar macéré, C= Compost, CBP = Compost-BP (co-compost avec du Burkina phosphate)

4.3.3. Effet de la fertilisation microdose sur le rendement en grain du sorgho en conditions de combinaison avec les amendements organiques

Dans les trois provinces, l'effet de la fertilisation microdose sur le rendement du sorgho, c'est-à-dire le gain de rendement du sorgho attribuable à la FM, a été influencé par le type d'amendement organique avec lequel la FM est combinée (variable *Treatment*) et aussi par le type de sol (Tableau 4.5). Le facteur type de sol (*Soil type*) a été clairement identifié comme affectant l'effet de la FM dans l'Oubritenga ($P < 0.001$), alors que dans la Sissili et le Zandoma, l'effet de ce facteur n'a été significatif qu'au seuil de 10%. Dans la Sissili, la teneur en éléments grossiers (*Soil coarse elements*, un proxy du type sol) a été identifiée comme affectant l'effet de la FM ($P < 0.05$). L'enherbement des parcelles (*Weed cover*) a quant à lui influencé l'effet de la FM dans la province de l'Oubritenga. Dans le Zandoma, le type de culture de l'année précédente (*Previous crops*) et la durée de mise en culture de la parcelle (*Duration of plot cultivation*) ont affecté l'effet de la FM. L'influence de ces facteurs a été fonction du type d'amendement organique avec lequel la FM est combinée (*Treatment x Previous crops*, *Treatment x Duration of plot cultivation* ; Tableau 4.5).

Dans la province de la Sissili, les gains de rendement les plus élevés dus à la fertilisation microdose ont été obtenus lorsque la microdose est appliquée seule sous forme d'engrais N-P-K (23-10-05 ; FM2). Ces gains de rendement ont été en moyenne significativement supérieurs à ceux du biochar macéré, mais pas à ceux de la FM classique (N-P-K, 14-23-14) et de la combinaison de ce dernier avec le compost (Figure 4.2a). Les gains de rendement obtenus par le biochar macéré,

la FM classique et sa combinaison avec le compost n'ont pas été en moyenne significativement différents entre eux. En moyenne, le gain de rendement dû à la FM a eu tendance à diminuer avec l'augmentation de la teneur en éléments grossiers du sol (Figure 4.2b).

Tableau 4.5: Variables identifiées par le modèle mixte comme affectant l'effet de la FM sur le rendement du sorgho dans chaque province.

Provinces	Variables	Pr(>Chisq)
Sissili	Treatment	0.033*
	Soil coarse elements (%)	0.048 *
	Soil type	0.087.
Oubritenga	Treatment	7.7e-14 ***
	Soil type	5.3e-06 ***
	Weed cover (%)	7.6e-05 ***
Zandoma	Treatment	0.054 .
	Previous crops	0.009 **
	Duration of plot cultivation	0.012 *
	Soil type	0.088 .
	Treatment : Previous crops	0.043 *
	Treatment: Duration of plot cultivation	0.018 *

Significance codes: $p < 0.001$ ***, $p < 0.01$ **, $p < 0.5$ *, $p < 0.1$ "."

Le facteur *treatment* comprend les différents traitements avec fertilisation microdose (FM, FM2, Bio+FM, C+FM et CBP+FM). FM = fertilisation microdose (engrais NPK 14-23-14), FM2 = fertilisation microdose (engrais NPK 23-10-05), Bio + FM = Biochar macéré, C= Compost, CBP = Compost-BP (co-compost avec du Burkina phosphate).

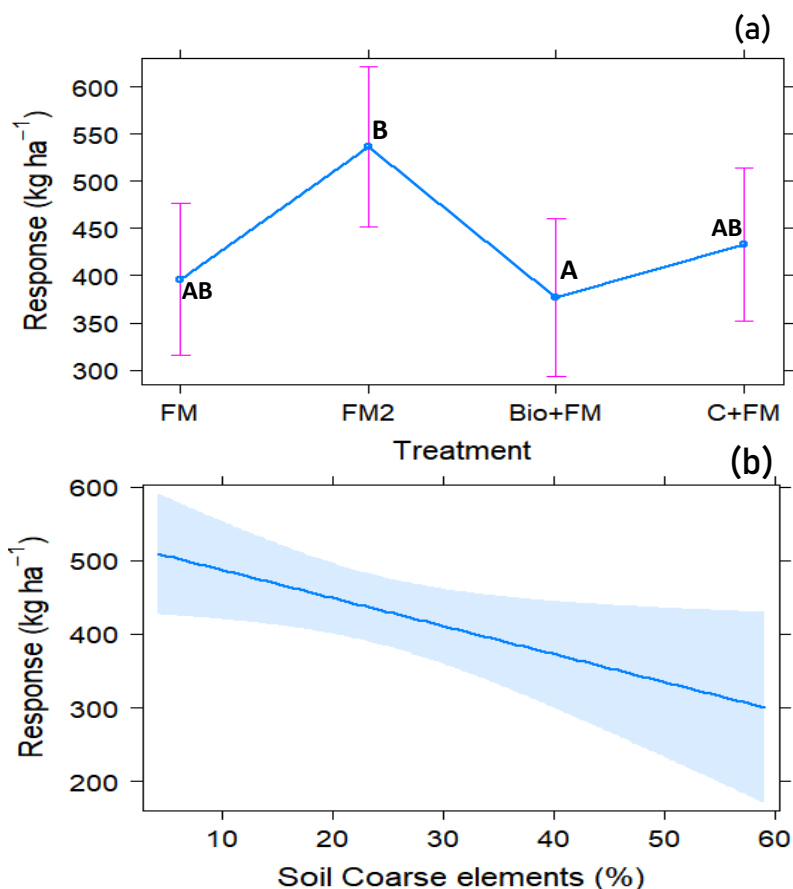


Figure 4.2: Gain de rendement de sorgho dû à la FM dans la Sissili en fonction (a) du type d'engrais ou d'amendement organique associé, (b) de la teneur en éléments grossiers du sol. FM = fertilisation microdose (engrais NPK 14-23-14), FM2 = fertilisation microdose (engrais NPK 23-10-05), Bio + FM = Biochar macéré, C = Compost. Les gains de rendement suivis d'une même lettre ne sont pas statistiquement différents.

Dans l'Oubritenga, les gains de rendement les plus élevés ont aussi été observés lorsque la FM est appliquée seule (Figure 4.3a). Ces gains de rendement ont été en moyenne significativement supérieurs à ceux obtenus lorsque la FM est combinée avec les amendements organiques (biochar macéré, Compost + FM et compost-BP + FM). Les gains de rendement dû à la FM lorsqu'elle est combinée avec les différents amendements organiques n'ont pas été significativement différents

entre eux. En moyenne, des gains de rendement significativement plus élevés ont été observés sur les *clays soils* comparés aux autres types de sols (Figure 4.3b). Une tendance à des gains de rendement plus faibles a été observée sur les *gravelly soils*. Cependant, en moyenne, ces niveaux de gain de rendement n'ont pas été statistiquement différents de ceux observés sur les *stream bank soils* et les *sandy soils* (Figure 4.3b). L'augmentation de l'enherbement des parcelles a eu pour effet de diminuer le gain moyen de rendement dû à la FM (Figure 4.3c).

Dans le Zandoma, il a été observé que le gain de rendement dû à la FM dépend de l'interaction entre le précédent cultural et le type d'amendement associé à la FM (Figure 4.4a). Globalement les gains de rendement résultant de la FM ont été plus élevés après un précédent de sorgho qu'après un précédent de légumineuse. L'influence du précédent sorgho sur le gain de rendement a été importante lorsque la FM est appliquée seule ($P < 0.001$), mais pas en combinaison avec les amendements organiques ($P > 0.05$). Pour le cas du biochar macéré, le gain moyen de rendement pour un précédent de sorgho et pour un précédent de légumineuse ont été quasi identiques. Ainsi, pour les parcelles avec un précédent cultural de sorgho, le gain moyen de rendement attribuable à la FM appliquée seule (500 kg ha^{-1}) a été significativement plus important que lorsqu'elle est combinée avec du compost-BP ou appliquée sous forme de biochar macéré. Ce gain n'a cependant pas été significativement différent de celui observé pour une combinaison de la FM avec du compost. Pour les parcelles avec un précédent de légumineuses, les gains moyens de rendement de la FM, appliquée seul ou en combinaison avec les amendements organiques (autour de 300 kg ha^{-1}), n'ont pas été statistiquement différents.

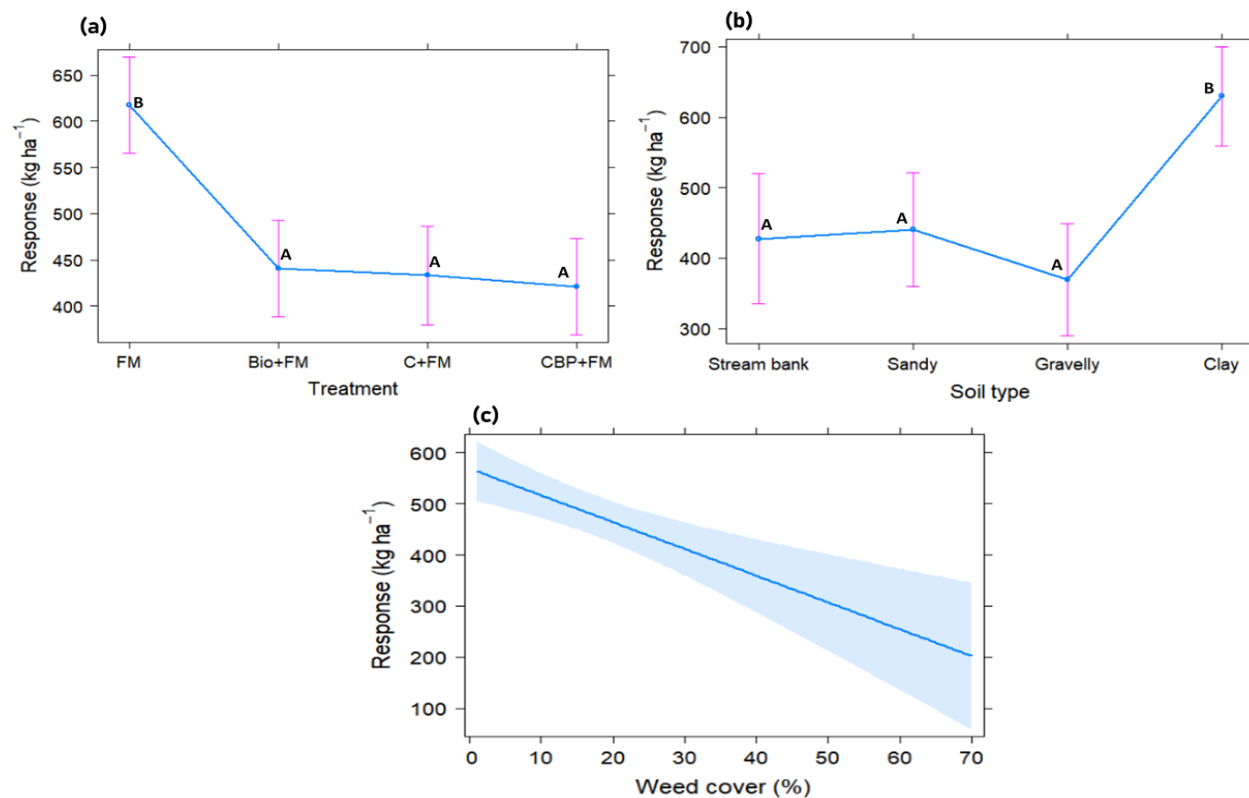


Figure 4.3: Gain de rendement de sorgho dû à la FM dans la province de l'Oubritenga en fonction (a) du type d'amendement organique associé, (b) du type de sol, (c) de la couverture des mauvaises herbes. Bio + FM = Biochar macéré, C = compost, CBP = Compost-BP (co-compost avec du Burkina phosphate). Les gains de rendement suivis d'une même lettre ne sont pas statistiquement différents.

Aussi, il a été observé qu'en moyenne, le gain de rendement lié à la FM tend à augmenter avec la durée de mise en culture des parcelles lorsque la FM est appliquée seule ou en combinaison avec le compost (cela, avec des pentes qui ne sont pas statistiquement différentes ; Figure 4.4b). Le gain de rendement est cependant resté quasi constant en fonction de la durée de mise en culture des parcelles lorsque la FM est appliquée sous forme de biochar macéré ou en combinaison avec le compost-BP (pentes des droites presque nulles ; Figure 4.4b). Les pentes de ces droites n'ont néanmoins pas été trouvées comme statistiquement inférieures à celle du compost + FM (Figure 4.4b).

Les proportions de parcelles pour lesquelles le VCR est < 1 (seuil de non-profitabilité) et ≥ 2 (seuil favorable à l'adoption) sont indiquées dans le Tableau 4.6. Dans la Sissili, la proportion la plus élevée de parcelles dont les gains de rendement à la fertilisation microdose ne permettent pas d'atteindre le seuil de profitabilité ($VCR < 1$) a été observé pour le biochar macéré (45%). Cette proportion a été suivie par celle de la FM classique (31%). L'association Compost + FM et la FM2 ont enregistré les plus faibles proportions de non-profitabilité ($\sim 20\%$). En effet, ce sont pour ces traitements que le plus grand nombre de parcelles ont obtenu un $VCR \geq 2$ (47% pour la FM2 et 34% pour le Compost + FM).

Dans l'Oubritenga, la part de parcelles avec un VCR inférieur au seuil de profitabilité ($VCR < 1$) a été très faible pour la FM appliquée seule (5%), alors que cette proportion a été d'environ 30% pour les combinaisons de la FM avec les amendements organiques (Tableau 4.6). 59 % des parcelles ont atteint le seuil favorable à l'adoption ($VCR \geq 2$) lorsque la FM a été appliquée seule. Ce taux a baissé à 40%, 39%

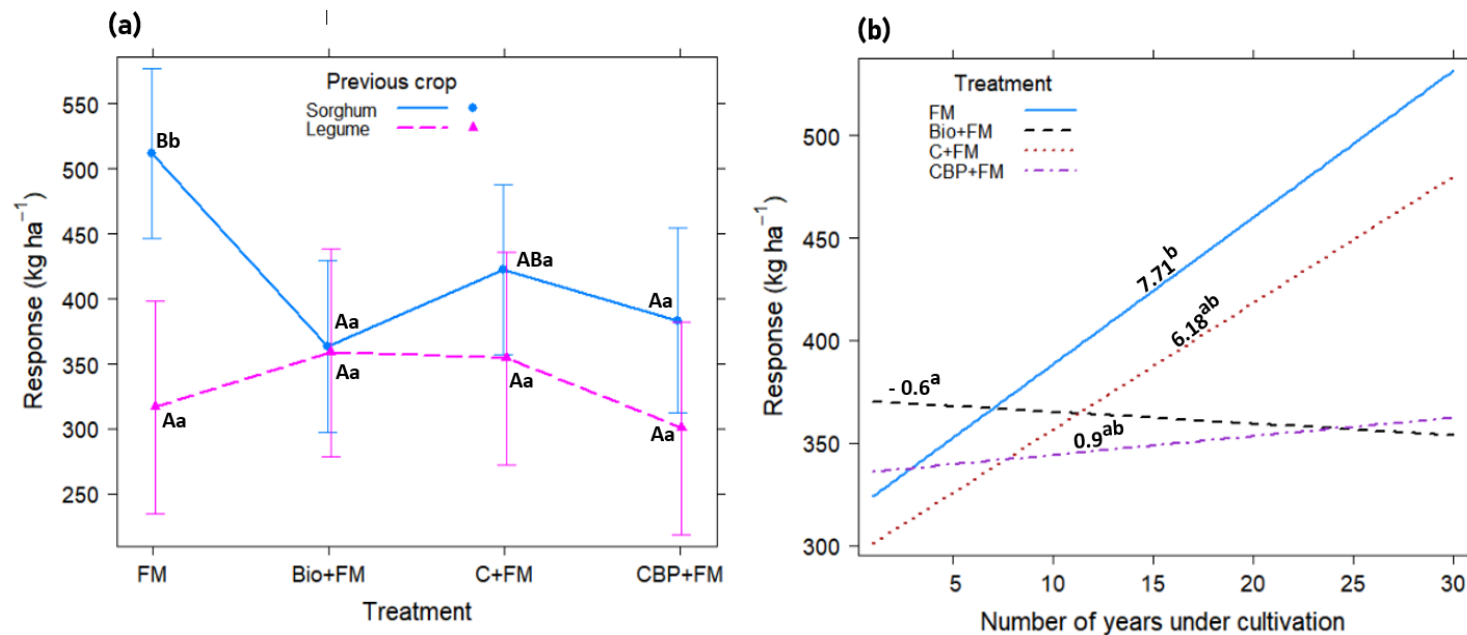


Figure 4.4: Gain de rendement du sorgho dû à la FM dans la province du Zandoma en fonction (a) de l'interaction entre le précédent cultural et le type d'amendement organique associé à la FM, (b) de l'interaction entre le nombre d'années de mise en culture de la parcelle et le type d'amendement organique associé à la FM. Bio + FM = Biochar macéré, C = compost, CBP = Compost-BP (co-compost avec du Burkina phosphate). Pour un même précédent cultural, les gains de rendement suivis d'une même lettre majuscule ne sont pas statistiquement différents. Pour un même type d'amendement associé, les gains de rendement suivis d'une même lettre minuscule ne sont pas statistiquement différents. Les nombres sur les droites de la figure b représentent les pentes (en kg ha⁻¹ an⁻¹), et les pentes suivies d'une même lettre minuscule ne sont pas statistiquement différentes.

et 31% respectivement pour le Compost + FM, le biochar macéré et Compost-BP + FM.

Dans le Zandoma, c'est pour l'association Compost-BP + FM que le plus de parcelles avec un VCR en dessous du seuil de rentabilité ($VCR < 1$) ont été observées (45%). Ce taux était compris entre 25 et 32 % pour les autres traitements (Tableau 4.6). Pour cette province, la proportion la plus élevée de parcelles qui ont atteint le seuil favorable à l'adoption ($VCR \geq 2$) a aussi été observée pour la FM appliquée seule (34%). Pour les combinaisons FM avec amendements organiques, le taux était compris entre 23 et 27%.

Tableau 4.6: Proportions de parcelles (%) avec un rapport bénéfice-coût (VCR) < 1 et ≥ 2 pour les traitements avec FM.

	Sissili		Oubritenga		Zandoma	
	VCR	VCR	VCR	VCR	VCR	VCR
	< 1	≥ 2	< 1	≥ 2	< 1	≥ 2
Traitements						
FM	31	25	5	59	25	34
FM2	21	47	n/a	n/a	n/a	n/a
Bio + FM	45	20	31	39	29	24
C + FM	23	34	31	40	32	27
CBP + FM	n/a	n/a	30	31	45	23

n/a = non applicable

FM = fertilisation microdose (engrais NPK 14-23-14), FM2 = fertilisation microdose (engrais NPK 23-10-05), Bio + FM = Biochar macéré, C = Compost, CBP = Compost-BP (co-compost avec du Burkina phosphate).

4.4. Discussion

4.4.1. Rendements en grain du sorgho dus aux traitements

Les meilleurs rendements en grain du sorgho ont été obtenus pour les traitements incluant la fertilisation microdose dans les trois zones agro-climatiques (Figure 4.1). Cette amélioration des rendements confirme encore une fois la capacité de la FM à améliorer la productivité céréalière des petites exploitations dans différentes conditions climatiques (Tabo et al., 2011; Okebalama et al., 2017). Les rendements obtenus lorsque la FM est combinée au compost ont été significativement supérieurs à ceux de la FM appliquée seule, surtout lorsque le compost est enrichi en Burkina phosphate (Figure 4.1). Ces niveaux de rendement plus importants résultent ici principalement des apports supplémentaires de nutriments par le compost et le co-compost Burkina phosphate (Tableau 4.3). L'effet des nutriments fournis par ces amendements organiques (compost et compost enrichi en P) est perceptible sur les rendements de ces traitements sans FM qui ont été significativement supérieurs à celui du témoin (Figure 4.1).

L'apport de biochar seul ne conduit pas à une amélioration des rendements. Les rendements des biochars simples ont été aussi faibles que ceux des traitements témoins (Figure 4.1). Ceci peut être dû au fait que les apports en nutriments des biochars simples sont très faibles (voir nuls pour le P ; Tableau 4.3). Par ailleurs, les quantités de biochar pour lesquelles des bénéfices sont rapportés dans la littérature en termes d'amélioration des caractéristiques physico-chimiques et biologiques du sol et de rendement des cultures sont de l'ordre de 5 à 10 t ha⁻¹ et même plus (Kamau et al., 2019 ; Kätterer et al., 2019 ; Apori et al.

2021). Les quantités de biochar simple ($62,5 \text{ kg ha}^{-1}$) et biochar macéré ($156,25 \text{ kg ha}^{-1}$) appliquées dans cette étude sont très en dessous de ces quantités.

Comme observé par Ncube et al. (2007), Ibrahim et al. (2015) et Somda et al. (2017), nos résultats montrent clairement que les rendements globaux des parcelles peuvent être davantage améliorés en combinant la FM à du compost ou à du compost enrichi en phosphate. Des analyses comme celles-ci, qui s'intéressent au rendement global de la combinaison engrais et amendements organiques, ne permettent toutefois pas de savoir si l'efficacité agronomique des nutriments est optimisée dans ces conditions.

4.4.2. Augmentation de rendement en grain du sorgho dû à la fertilisation microdose combinée avec les amendements organiques

Dans les trois zones agro-climatiques, en moyenne, les gains de rendement les plus élevés dus à l'effet de la fertilisation microdose ont été observés lorsque celle-ci est appliquée seule et non en combinaison avec les amendements organiques testés (Figure 4.2, 4.3 et 4.4). Ces résultats tendent à montrer que l'efficacité agronomique des engrais en FM est meilleure lorsque l'engrais est appliqué seul que combiné avec du compost ou appliqué sous forme de biochar macéré. Dans le cas de la Sissili, le gain de rendement le plus élevé a été observé en moyenne pour la fertilisation microdose FM2 (Figure 4.2), qui est plus orientée vers une fourniture d'azote (engrais NPK 23-10-05 ; Tableau 4.3), et non pas pour la FM classique (engrais NPK 14-23-13, Tableau 4.3) qui est orientée en priorité vers la fourniture de phosphore. Il apparaît donc

qu'au-delà de la vision classique de la FM développée en Afrique de l'Ouest qui est de fournir prioritairement du phosphore (Buerkert et al., 2001; Muehlig-versen et al., 2003), il faudrait explorer dans les zones de pluviométrie plus élevée comme la Sissili des formulations d'engrais pour la fertilisation microdose qui apportent davantage d'azote que de phosphore. En effet, si le phosphore et l'azote sont reconnus comme les nutriments limitants le plus la production en Afrique de l'Ouest, des travaux montrent que l'azote tend à être le nutriment le plus limitant dans les zones de forte pluviométrie (Buerkert, et al., 2002; Buerkert and Schlecht, 2013).

Des situations où le gain de rendement dû à la FM en combinaison avec les amendements organiques testés a été supérieur à celui observé lorsqu'elle est appliquée seule (effet de synergie) n'ont pas été mises en évidence dans notre analyse. L'un des processus à travers lequel l'efficacité agronomique des nutriments provenant des engrais minéraux peut être améliorée par les amendements organiques est l'amélioration de l'humidité du sol par ces amendements (Zougmore et al., 2004; Agegnehu et al., 2016 ; Liu et al., 2013). En plus de ce mécanisme, la synergie en termes de gain de rendement peut s'opérer à travers l'immobilisation temporaire de l'azote par les amendements organiques, ou par des mécanismes indirects tels que le blocage des sites d'adsorption du P par les molécules organiques, l'amélioration temporaire de la contrainte d'acidité du sol et l'apport d'autres nutriments limitants non fournis par les engrais (Geiger et al., 1992 ; Vanlauwe al., 2015). Au vu des petites quantités d'amendements organiques appliquées dans notre étude, le mécanisme d'interaction positif par l'amélioration de l'humidité du sol était peu probable.

Considérant la diversité de contextes couverts dans notre étude (climat, types de sols, historique des parcelles ; Tableau 3.1 et 4.4), il était espéré la mise en évidence de situations de synergies liées à au moins un des autres mécanismes rapportés ci-dessus, comme observé par Vanlauwe et al. (2011) pour la combinaison de l'engrais avec le compost et le fumier. Cependant, il faut noter que la synergie entre engrais minéraux et ressources organiques en termes de gain de rendement a été le plus souvent rapportée pour des combinaisons avec des matières organiques de faibles et de moyennes qualités (Chivenge et al., 2011), ou suite à l'épandage direct des résidus de cultures (Bationo et al., 1993; Buerkert et al., 2000; Akponikpè et al., 2008). Cette synergie se faisant principalement à travers l'amélioration de l'humidité sol pour le cas des résidus de culture et par l'immobilisation temporaire ou la libération progressive des nutriments pour le cas des matières organiques de faible ou de moyenne qualité (Palm et al., 2001; Margenot et al. 2016). Les matières organiques de haute qualité quant à elles peuvent fournir rapidement des nutriments à des niveaux comparables ou même supérieurs aux engrais minéraux (Vanlauwe et al., 2011; Margenot et al., 2016). Dans ces situations, cela conduit dans le meilleur des cas à des effets additifs, voire à de plus faibles efficiences agronomiques des nutriments de la combinaison (Chivenge et al., 2011 ; Vanlauwe et al., 2011). C'est vraisemblablement ce qui a été observé dans notre étude pour le compost et le compost-BP (Figure 4.2, 3.3, et 4.4.). En effet, il a été observé que les niveaux de rendements des traitements de compost et de compost-BP sans FM sont en moyenne significativement supérieurs à celui du témoin, et même comparables à ceux des traitements avec FM dans la Sissili (Figure 4.1). Cela suggère que les

nutriments fournis par ces amendements organiques (Tableau 4.3) représentent une part importante des besoins en nutriments du sorgho dans les contextes agricoles de ces zones. De ce fait, le potentiel d'augmentation du rendement par la FM se retrouve réduit lorsqu'elle est combinée à ces amendements organiques. En général, il est donc recommandé d'appliquer directement à la parcelle les amendements organiques de haute qualité (teneur en N > 2.5%, teneur en lignine < 15%, teneur en phénol < 4%) et d'associer les matières organiques de faible et moyenne qualité avec des engrais minéraux (Palm et al., 2001; Vanlauwe et al., 2002b).

La tendance à de plus faibles réponses de la FM pour le biochar macéré (Figure 4.2 et Figure 4.4) n'est pas due à des apports de nutriments par le biochar simple comme pour le compost et le compost-BP (Tableau 4.3). Plusieurs travaux ont mis en évidence que la cinétique de libération des nutriments par du biochar enrobé d'engrais ou ayant adsorbé de l'engrais est plus faible que celle des engrais minéraux (*slow release fertilizer* ; Kim et al., 2014; Zhao et al., 2016; An et al., 2021). Ainsi, il paraît vraisemblable que la lente libération de la faible quantité de nutriments qu'apporte le biochar macéré ne permet pas de booster suffisamment le développement des plantes, entraînant dès lors de plus faibles réponses que lorsque la FM est appliquée seule.

Dans le Zandoma, il a été observé qu'en moyenne, l'effet de la FM sur l'augmentation du rendement était plus important pour des précédents culturaux de sorgho que pour des précédents culturaux de légumineuses (Figure 4.4a). Les fanes de légumineuses étant systématiquement ramassées et stockées pour le bétail dans le système de culture du Zandoma, les éventuels effets résiduels positifs des précédentes

légumineuses sur la fertilité du sol sont peu probables. L'effet du précédent sorgho pourrait s'expliquer par les effets résiduels des précédents apports d'engrais. En effet, dans cette province, contrairement aux parcelles de légumineuse, la plupart des parcelles de sorgho sont cultivées avec des apports de petites quantités d'engrais. 69% des parcelles ont ainsi bénéficié d'apports d'engrais l'année ayant précédé l'essai, et la moitié des parcelles analysées ont même bénéficié d'apport d'engrais $\geq 50 \text{ kg ha}^{-1}$ (Tableau 4.4). Le besoin en nutriments des cultures dont le développement a été boosté par la FM est en général supérieur à ce qui est fourni par la FM seule (Ibrahim et al., 2016; Tovihoudji et al., 2017). Dès lors, les quantités résiduelles de nutriments liés aux apports précédents d'engrais (notamment le P) pourraient constituer des sources additionnelles de nutriments permettant d'augmenter la réponse à la FM. L'analyse effectuée au chapitre 3 (Figure 3.7c) montre bien que le potentiel de réponse de la FM dans le Zandoma est optimum pour les apports précédents d'engrais compris entre 50 et 100 kg ha^{-1} .

Ce potentiel de réponse tend à diminuer pour les traitements combinant la FM avec le compost ou le compost-BP du fait de l'apport relativement important de nutriments par ces amendements comme indiqué précédemment. Cette réduction de l'effet de la FM est statistiquement significative pour le compost-BP mais pas pour le compost simple, probablement à cause de l'apport plus important en P du compost-BP comparé au compost simple (Tableau 4.3). Pour le biochar macéré, la quasi-absence de différence entre l'effet de la FM pour le précédent de sorgho et le précédent de légumineuse est potentiellement due au faible développement des plantes causée par la

lente libération des nutriments, ce qui ne permet pas aux plantes d'exploiter les nutriments résiduels des apports d'engrais précédents.

Dans le Zandoma, la tendance à l'augmentation de la réponse du sorgho à la FM avec la durée de mise en culture des parcelles pour la FM appliquée seule ou en combinaison avec le compost (Figure 4.4b) est aussi probablement liée à l'effet des apports précédents d'engrais (effet du précédent cultural). En effet, la principale succession culturale dans le Zandoma est la culture continue de sorgho, parfois interrompue par une légumineuse (arachide ou niébé). Ainsi, les parcelles avec les durées de mise en culture élevées sont celles qui ont aussi potentiellement le plus bénéficié des cultures de sorgho, et donc des effets cumulatifs des précédents apports d'engrais. A l'opposé, les parcelles avec de faibles durées de mise en culture sont le plus souvent des parcelles remises en culture après de courtes jachères (Tableau 4.4) qui ne permettent pas de reconstituer la fertilité des sols (chapitre 3, section 3.4.1; Serpantié and Ouattara, 2001). Ainsi, ces parcelles n'offriraient pas d'effet résiduel de nutriments contrairement aux parcelles continuellement cultivées avec de petits apports d'engrais. Ce sont probablement les mêmes processus que ceux évoqués ci-dessus (apport plus important en P pour le compost-BP, et plus faible développement des plantes pour le biochar macéré) qui expliqueraient l'absence de l'effet de la durée de mise en culture sur la réponse de la FM en combinaison avec le compost-BP et le biochar macéré (Figure 4.4b).

La variable « teneur en élément grossier du sol » dans la Sissili et les variables « type de sol » et « enherbement de la parcelle » dans l'Oubritenga ont été identifiées comme influençant l'effet de la FM

indépendamment du type d'amendement organique avec lequel la FM a été combinée. Ainsi, l'augmentation de la teneur en éléments grossiers du sol et l'enherbement des parcelles ont eu des effets négatifs sur la réponse de la FM, et de meilleures réponses à la FM ont été en général observées sur les *clays soils* comparées aux autres types de sols dans l'Oubritenga (Figure 4.2 et 4.3). Ces variables avaient aussi été identifiées comme affectant de façon similaire l'effet de la FM lorsqu'elle est appliquée seule (chapitre 3, Tableau 3.4 -3.5, Figure 3.5). La mise en exergue de ces facteurs comme source de variabilité de l'effet de la FM pour une gamme de situations plus large (combinaison de la FM avec divers amendements organiques) semble indiquer une influence plus générale de ces facteurs sur l'effet de la FM. L'effet de la teneur en éléments grossiers du sol traduit d'ailleurs indirectement un effet type de sol. En effet, dans la Sissili, les *Black soils* (caractérisés par de meilleures réponses à la FM que les autres types de sols ; Tableau 3.3 du chapitre 3) sont essentiellement des sols avec de faibles teneurs en éléments grossiers alors que les sols avec les fortes charges en éléments grossiers sont les *gravelly soils* et dans une moindre mesure des *sandy soils* (Tableau 3.1 ; Figure 3.5b).

L'analyse des rapports bénéfice-coût (VCR) des différents traitements avec fertilisation microdose a indiqué que les proportions les plus élevées de parcelles dont les réponses n'atteignent pas le seuil de rentabilité ($VCR < 1$) ont été observées soit pour le biochar macéré (45% dans la Sissili), soit pour la combinaison compost-BP + FM (45% dans le Zandoma). Cela résulte du fait qu'en moyenne, de plus faibles réponses à la FM ont été observées sur ces traitements. A l'opposé, les proportions les plus importantes de parcelles dont les réponses ont

atteint le seuil favorable à l'adoption ($VCR \geq 2$) ont été observées pour les traitements qui ont montré les meilleures efficacités agronomiques à la FM. Ce sont la FM2 dans la Sissili (47%) et la FM classique dans l'Oubritenga et le Zandoma (respectivement 59% et 34%). Parmi les traitements combinant les amendements organiques avec la FM, c'est avec le traitement compost + FM que les meilleurs effets de la FM ont été observés. Par conséquent, les proportions de parcelles qui ont atteint le seuil d'adoption ont été plus élevées sur ce traitement que les autres traitements avec combinaison d'amendements organiques (40%, 34%, et 27% respectivement pour l'Oubritenga, la Sissili et le Zandoma).

4.4.3. Implication en termes de conseils aux producteurs

Les conseils qui peuvent être formulés sur base des résultats des essais de stratégies complémentaires sont les suivants. Afin d'optimiser leurs niveaux de production céréalière, les producteurs ne disposant pas de suffisamment de compost, et par extension de fumier, de bonne qualité pour amender toutes leurs parcelles devraient appliquer la FM et ces amendements organiques sur différentes parcelles ou en assolement sur une même parcelle. Ainsi, ils pourront effectuer une rotation d'une année à l'autre en apportant la FM sur les parcelles ayant précédemment reçu le compost et/ou fumier et vice versa, afin de bénéficier des éventuels arrière-effets des amendements organiques. Pour les producteurs disposant de quantités suffisantes de compost et/ou fumier pour couvrir leurs parcelles, il sera pertinent de les combiner avec de la FM, car la combinaison permet d'avoir des rendements totaux plus élevés à la parcelle, mais aussi de rentabiliser l'application de la FM dans la plupart des situations ($VCR > 1$ pour ~ 70 % des cas ; Tableau 4.6). Par ailleurs, la combinaison permettrait de maintenir de meilleurs

niveaux de fertilité des sols comparés à l'application de la FM seule, du fait de reliquats en nutriments plus importants (plus faible efficience agronomique de la FM en combinaison avec des amendements organiques comparée à son application seule) et aussi par le biais des propriétés de ces amendements organiques sur les paramètres physico-chimiques et biologiques du sol.

Au vu des bons niveaux de rendement à la parcelle du compost-BP (Figure 4.1) et du risque plus élevé de non-profitabilité de la FM ($VCR < 1$) en combinaison avec le compost-BP (45% dans le Zandoma), il est préférable que cet amendement organique soit appliqué séparément sur d'autres parcelles que celles en FM. Cela permettrait aux producteurs d'optimiser leur niveau de production en sorgho, et de bénéficier des arrière-effets en P du compost-BP qui pourrait booster la réponse à la FM dans le cadre d'une rotation. Pour le biochar, au regard des faibles rendements et aussi du risque élevé de non-profitabilité de la FM dans le cas du biochar macéré (45 % dans la Sissili), les biochars, ou du moins les quantités testées dans cette étude ne sont pas à conseiller pour application sous forme de microdosage.

4.5. Conclusions

Des essais ont été conduits sur des parcelles de producteurs dans trois zones agro-climatiques (provinces) du Burkina Faso, sur différents types de sol et d'historiques de parcelle, pour analyser les gains de rendement attribuables à la FM lorsqu'elle est combinée ou non avec des amendements organiques. Il a été mis en évidence qu'en moyenne, les meilleurs rendements sont obtenus lorsque la FM est combinée au compost et au compost enrichi en Burkina phosphate (compost-BP).

Cependant, il s'est avéré que le gain de rendement attribuable à l'application de la FM est meilleur lorsque la FM est appliquée seule.

Pour la province de la Sissili (zone de pluviométrie plus élevée, 800 à 1000 mm/an), où deux types de formulation de la FM ont été testés, il a été observé que les meilleurs gains de rendement dus à la FM ont été en moyenne obtenus avec la formulation d'engrais qui apporte plus d'azote et moins de phosphore que la formulation classiquement vulgarisée. Ceci souligne la nécessité d'adapter la formulation de la FM aux zones agro-climatiques. Aussi, l'effet résiduel des précédents apports d'engrais est apparu comme un facteur qui améliore le gain de rendement (efficience agronomique) attribuable à la FM dans la province du Zandoma.

En moyenne, les plus faibles effets de la FM en termes de gain de rendement ont été observés lorsqu'elle était appliquée sous forme de biochar macéré ou en combinaison avec le compost enrichi en phosphate (compost-BP). Cette réduction de l'effet de la FM est cependant restée modérée lorsque la FM est combinée avec le compost simple, la FM étant rentable dans ce cas dans environ 70 % des parcelles analysées dans les trois zones agro-climatiques. Il apparaît donc de ces résultats que les combinaisons de la FM avec les amendements organiques testés (surtout le biochar macéré et le compost-BP) ne sont pas des options adaptées pour optimiser la production des petits producteurs, alors que la combinaison du compost simple avec la FM demeure pertinente pour un objectif de gestion intégrée de la fertilité des sols pour des producteurs qui disposeraient de suffisamment de compost pour amender leurs parcelles. Davantage d'études sont nécessaires pour mieux appréhender les mécanismes à l'origine des

faibles réponses de la FM pour le biochar macéré, et aussi pour rechercher des doses et/ou des qualités d'amendements organiques qui pourraient améliorer l'efficacité agronomique de la FM, comme observé pour les parcelles ayant bénéficié de précédents apports d'engrais.

Chapitre 5

Conclusions générales et perspectives

5.1. Démarche d'analyse de la variabilité de la fertilisation microdose

L'objectif général de cette thèse était d'identifier les facteurs déterminants la variabilité de la réponse du sorgho à la FM dans les contextes agricoles du Burkina et de proposer des domaines de recommandation pour lesquels les gains de rendement et la rentabilité économique dus à la FM sont acceptables. Pour atteindre cet objectif, la démarche a été : (i) dans premier temps, de réaliser une méta-analyse de la littérature publiée sur la FM en Afrique subsaharienne (ASS) afin de mettre en évidence les grandes tendances de variabilité de la réponse des cultures céréalières à la FM ; (ii) de conduire ensuite des essais agronomiques dans 3 zones agro-climatiques du Burkina Faso, pour analyser de manière spécifique à ces contextes les facteurs de variabilité de la réponse du sorgho à la FM ; (iii) et enfin de réaliser des essais agronomiques qui combinent la FM avec des apports d'amendements organiques afin de rechercher les situations de parcelle où les combinaisons amélioreraient l'effet de la FM en termes de gain de rendement du sorgho.

5.2. Facteurs de variabilité de la réponse à la fertilisation microdose

La méta-analyse a mis en évidence une tendance générale à l'augmentation de la réponse des céréales à la FM avec la disponibilité en eau. Cela, soit à travers l'augmentation du niveau de la pluviométrie en fonction des zones climatiques, soit à travers le captage de l'eau par la mise en place de techniques de conservation d'eau dans les zones de faibles pluviométries. Par ailleurs, il a aussi été observé que les

meilleures réponses à la FM sont obtenues quand les engrais apportent à la fois du N et P, et que la réponse tend à augmenter avec les doses de ces nutriments. Ces relations entre la réponse et la disponibilité en eau ou les doses en nutriments (notamment en P) ont cependant eu tendance à se complexifier pour les sols de textures moyenne et lourde (interaction de la texture du sol avec les variables climat et teneur en P). Ces interactions ont été liées aux processus physico-chimiques plus complexes qui interviennent dans le sol avec l'augmentation des particules fines (colloïdes) du sol (chapitre 2).

Les essais agronomiques ont confirmé les relations mises en évidence par la méta-analyse et permis d'identifier d'autres facteurs spécifiques influençant la réponse à la FM dans différents contextes agro-climatiques du Burkina Faso (chapitre 3). Il a ainsi été constaté une tendance globale à de meilleures réponses à la FM avec l'augmentation de la pluviométrie suivant le gradient agro-climatique nord-sud du pays. En zone de pluviométrie élevée comme la Sissili (800-1000 mm), il a par ailleurs été observé le besoin de recourir à des types d'engrais qui apportent plus d'azote et moins de phosphore que la formulation classique couramment vulgarisée. En outre, il a été mis en évidence qu'en moyenne, la réponse à la FM augmente dans un premier temps avec le niveau global de fertilité des parcelles (la fertilité globale étant représentée par le niveau de productivité du traitement témoin), jusqu'à un certain seuil de fertilité (de rendement du témoin) au-delà duquel la réponse baisse. Cette structure générale de la réponse est le résultat d'interactions complexes entre le type de sol, la topographie du milieu, la pluviométrie, l'historique de la parcelle et la qualité de gestion de la parcelle. En effet, si les meilleures réponses à la FM ont tendance à être

observées sur les types de sols avec de meilleures fertilités inhérentes dans chaque province, de bonnes réponses ont aussi été observées plus généralement sur les parcelles qui ont bénéficié de l'effet résiduel de précédents apports modérés d'engrais ou de précédentes cultures de légumineuses. Ces bonnes réponses sont conditionnées par une bonne gestion de l'enherbement et le respect des timings de l'application des engrais. Les faibles réponses ont été observées d'une part, sur des parcelles présentant des contraintes majeures (profondeur < 40 cm, problème d'engorgement d'eau, trop faible niveau de fertilité initial) et d'autre part, sur les parcelles ayant bénéficié d'effets résiduels liés à d'importants apports précédents d'engrais et/ou sur les parcelles ayant été défrichées pour la première fois ou après de longues périodes de jachères.

5.3. Effet des amendements organiques sur l'effet de la fertilisation microdose

Malgré la prise en compte de la diversité du contexte biophysique et de l'historique des parcelles dans les essais, il n'a pas été observé de situations où la combinaison de la FM avec les amendements organiques (compost, compost enrichi en P, ou biochar macéré) a amélioré l'effet de la FM sur le gain de rendement. Au contraire, comparé à la FM appliquée seule, il a été observé une tendance à la réduction de l'effet de la FM lorsqu'elle est combinée avec les amendements organiques (chapitre 4). Cette tendance à la réduction de l'effet de la FM est cependant restée modérée dans le cas du compost simple comparé aux autres amendements organiques (compost + BP et biochar macéré), de telle sorte que dans environ 70 % des parcelles

analysées dans chaque province, les gains de rendement de la FM en combinaison avec le compost simple permettaient de rentabiliser la FM ($VCR > 1$). En outre, après la FM appliquée seule, c'est pour la combinaison compost + FM que la proportion de parcelles où les gains de rendement atteignent le seuil favorable à l'adoption ($VCR > 2$) a été la plus élevée.

5.4. Recommandations pour la vulgarisation de la fertilisation microdose au Burkina Faso

Sur base de la méta-analyse et des essais agronomiques, la structure générale de la réponse à la FM peut être schématisée comme une courbe en cloche qui est fonction de la fertilité globale rencontrée sur les parcelles. On entend par fertilité globale, les interactions entre les différents facteurs biophysiques (type de sol, topographie, climat), d'historique et de gestion des parcelles qui concourent à donner un environnement favorable à la productivité des parcelles en l'absence d'apport d'engrais. Ainsi, cette courbe en cloche peut être divisée en trois zones : (i) une zone initiale de faible réponse à la FM qui correspond à des parcelles de trop faible niveau de fertilité chimique et/ou présentant des contraintes physiques ou de gestion majeure; (ii) une zone centrale de bonne réponse, correspondant à des parcelles de fertilité intermédiaire; (iii) puis une zone de réduction du potentiel de réponse à la FM qui correspond à des parcelles dont le niveau de productivité sans engrais est proche du potentiel de rendement permis en FM dans le contexte agro-climatique considéré.

La première implication de ces résultats en termes de vulgarisation est que pour espérer obtenir le plein potentiel de réponse de la FM, il est

nécessaire d'assurer une bonne gestion de l'enherbement des parcelles et de respecter le timing de l'application de l'engrais (NPK et urée). Outre cet impératif de bonne gestion de la parcelle, l'application de la FM devrait être priorisée sur les parcelles présentant des niveaux de fertilité intermédiaire. De façon empirique, cela correspondrait aux parcelles où les rendements de sorgho sans engrais sont compris entre 400 à 1000 kg ha⁻¹ dans la Sissili et entre 400 et 700 kg ha⁻¹ dans l'Oubritenga (Figure 3.3). Bien qu'il n'ait pas été mis en évidence de relation entre le niveau de la productivité des parcelles témoin et la réponse à la FM dans le Zandoma, la gamme de valeurs de 400 à 700 kg ha⁻¹ pourrait être considérée au vu des similitudes en termes de pluviométrie et de système de culture avec la province de l'Oubritenga (Tableau 1.2). En considérant les facteurs de variabilité, l'application de la FM devrait être priorisée sur les sols de bonne fertilité inhérente que sont les *black soils* dans la Sissili, les *clay soils* dans l'Oubritenga et les *stream bank soils* dans le Zandoma. Plus généralement, ce serait sur les parcelles ayant bénéficié d'apports modérés d'engrais l'année précédente (50 à 100 kg ha⁻¹ dans le Zandoma et l'Oubritenga, et 100 à 300 kg ha⁻¹ dans la Sissili ; Figure 3.7c et Tableau 3.3) ou sur les parcelles où les fânes d'un précédent cultural de légumineuse ont été enfouies (Tableau 3.3).

La FM ne devrait pas être appliquée sur les parcelles dont les niveaux de productivité sans engrais sont déjà élevés. C'est par exemple le cas des parcelles nouvellement défrichées ou ayant bénéficié de précédents apports d'engrais de plus 300 kg ha⁻¹ dans la Sissili. Par extension, c'est également le cas des parcelles ayant bénéficié de précédents apports d'amendements organiques de bonne qualité en quantités élevées

(p. ex., compost, compost-BP, fumier, etc.). Une règle simple de cette recommandation serait de ne pas appliquer la FM sur les parcelles dont les niveaux de rendements sans engrais atteignent le 3^e quartile de la distribution du rendement en FM dans le contexte agricole considéré. Dans les contextes de notre étude, ce serait les parcelles avec des niveaux de rendements ≥ 1900 , 1300 et 1000 kg ha⁻¹ respectivement pour la province de la Sissili, de l'Oubritenga et du Zandoma (Figure 3.2). L'application de la FM devrait aussi être évitée sur les sols superficiels (profondeur < 40 cm) et sur les parcelles avec de trop faibles niveaux de fertilité initiale. Les sols superficiels correspondent en général aux *gravelly soils* et *stony-gravelly soils* (Figure 3.5a – 3.7a), et les parcelles de faible fertilité initiale correspondent dans cette étude aux parcelles nouvellement remises en culture après des jachères de moins de 5 ans dans la province du Zandoma. La FM ne devrait également pas être appliquée sur les parcelles soumises à des engorgements d'eau. Cette dernière contrainte pourrait toutefois être atténuée par la mise en place de techniques qui améliorent le drainage (p. ex., la culture sur billons avec ouverture de sillons de drainage). Par ailleurs, l'association de la FM avec des techniques de collecte d'eau ou de conservation de l'humidité du sol permettrait d'améliorer substantiellement la réponse de la FM dans les zones de faible pluviométrie comme le Zandoma et l'Oubritenga, surtout sur les *gravelly soils* (Figure 2.8).

Les services de vulgarisation conseillent en général aux producteurs de combiner les amendements organiques avec les engrais dans un objectif de gestion intégrée de la fertilité et afin d'obtenir des niveaux de rendement élevés à la parcelle comme observés dans cette étude (Figure

4.1). La dose d'amendement organique recommandée au Burkina Faso est de 2,5 t/ha/an. Cette dose est hors de portée de la majorité des petits producteurs pour couvrir l'ensemble de leurs parcelles. Compte tenu des résultats de cette étude, il ressort que l'on pourrait recommander aux producteurs qui ont des difficultés à accéder aux engrais et à produire des quantités suffisantes d'amendements organiques, de ne pas appliquer à la fois les engrais et les amendements organiques de bonne qualité comme le compost et le compost + BP sur une même superficie. Ainsi, l'engrais serait appliqué sous forme de microdose et les amendements organiques de façon localisée par poquet sur des parcelles différentes ou en assolement sur une même parcelle. Cette approche permettra d'optimiser les gains de rendement à la parcelle tant de la FM que des amendements organiques, et au final d'obtenir un niveau de productivité plus élevé à l'échelle de l'exploitation. Par ailleurs, en pratiquant une rotation entre l'apport d'amendements organiques et la pratique de la FM, le producteur pourrait bénéficier des arrière-effets des amendements organiques pour booster davantage la réponse à la FM. Dans le cadre d'une telle approche, il faudrait encourager les producteurs à composter au moins une partie de leurs résidus de cultures afin d'entretenir le système.

La combinaison de la FM avec des amendements organiques comme le compost (pour lesquels la réduction de l'effet de la FM est modérée ; Figure 4.2 et 4.4) reste cependant pertinente pour un producteur qui disposerait de quantités suffisantes de ce type amendement organique pour amender toutes ses parcelles, ou du moins les principales parcelles de son exploitation. Cela permettra au producteur d'avoir des rendements plus élevés sur ses parcelles, de rentabiliser l'application de

la FM dans la plupart des situations et potentiellement d'améliorer progressivement la fertilité de ses parcelles.

5.5. Limites et perspectives de l'étude

- *Comment mieux appréhender les facteurs de variabilité de la réponse à la FM ?*

La méta-analyse de la littérature publiée a permis de synthétiser à l'échelle de l'Afrique subsaharienne les grands facteurs de variabilité de la réponse à la FM. La portée opérationnelle de cette analyse était cependant limitée par le niveau de détail parfois très global des données renseignées dans les publications et aussi par les spécificités des contextes agricoles des zones d'intérêt. Ainsi, des essais agronomiques tels que réalisés dans notre étude sont nécessaires pour préciser les facteurs de variabilité spécifiques aux sites.

La démarche de recherche des facteurs de variabilité a pris en compte la diversité des facteurs biophysiques, d'historique et de gestion des parcelles des zones d'étude. Toutefois, une part importante de la variance de la réponse à la FM est restée non expliquée par les analyses de régression linéaire multiple. Bien que la recherche de relations non linéaires n'ait pas été concluante, les ajustements de courbes enveloppes (*boundary lines*) ont permis d'identifier des facteurs de variabilité supplémentaires. Il faut cependant noter que les *boundary lines* mettent en évidence des potentiels de réponse. Elles indiquent des conditions nécessaires, mais non suffisantes pour obtenir les réponses les plus élevées mises en évidence. Au-delà des limites des modèles de régression, la faible proportion de la variance expliquée pourrait être

due : au fait que certains facteurs explicatifs n'aient pas été collectés ; à des interactions complexes entre facteurs que la taille des échantillons analysés n'a pas permis de mettre en évidence ; ou à l'existence d'une certaine imprécision dans les variables collectées. En effet, il faut noter que l'historique des parcelles a été collecté par des enquêtes auprès des producteurs, qui dans leurs habitudes n'enregistrent pas les opérations culturales réalisées sur leur exploitation. Il est donc tout à fait possible que certaines données (p. ex., les doses d'engrais précédents et la durée de culture des parcelles) n'aient pas été correctement rapportées. Aussi, les opérations de gestion effectuées sur certaines parcelles d'expérimentation et leurs implications ont pu ne pas être correctement répertoriées. C'est par exemple le non-enfouissement de l'engrais par les opérateurs lors de l'application qui peut conduire à d'éventuelles pertes d'engrais par ruissellement. En outre, malgré le caractère opérationnel de la classification locale des sols par les producteurs, pour un même type de sol, il peut exister des différences de texture, de microtopographie ou de fertilité inhérente. C'est le cas par exemple pour la classe des « *black soils* » dans la Sissili qui était moins homogène que les autres types de sols distingués dans cette province. Une prise en compte de données d'analyses physico-chimiques des sols aurait peut-être permis d'améliorer la variance expliquée. Les échantillons de sol ont été prélevés pour analyse, mais les données n'étaient pas encore disponibles lors du traitement des données. Une taille d'échantillon plus importante aurait permis d'explorer d'autres techniques d'analyse comme le « *random forest* » par exemple. Toutefois, la mise en place et la collecte de données pour de grands échantillons d'essais en milieu réel tels que réalisés dans cette étude sont

fastidieuses, couteuses et peuvent conduire à plus d'imprécisions dans les données collectées.

De manière générale (chapitre 2 et 3), il est apparu que la réponse à la FM se présenterait comme une courbe en cloche ; la réponse étant fonction de la fertilité globale des parcelles (laquelle résulte de l'interaction entre le type de sol, le climat et l'historique de la parcelle). Ainsi, par rapport aux situations de fertilité intermédiaire où les réponses sont élevées, il existerait d'une part des seuils (niveaux) de contraintes de certaines variables ou de leurs interactions qui ne permettent pas une bonne réponse à la FM, et d'autre part des niveaux de fertilité déjà favorables à partir desquels les réponses deviennent faibles. Pour améliorer la compréhension de la variabilité de la réponse (au vu des limites des outils statistiques utilisés pour traiter les données), il faudrait envisager de tester la réponse en isolant des gradients plus fins de variables au sein d'expériences distinctes afin d'identifier les valeurs seuils de ces variables. C'est par exemple : (i) des analyses plus fines (expériences en serre) de la réponse en fonction du type de sol (texture et charge d'éléments grossiers) ou du climat (pluviosité) ; (ii) puis tester in situ pour un même type de sol et de climat, l'effet de pratiques agricoles (p.ex., des doses d'engrais et/ou d'amendements organiques précédents, ou des proportions de résidus de légumineuses précédentes à enfouir sur la parcelle) sur la réponse à la FM. Ce type d'analyse pourrait être accompagné de l'utilisation de modèles de simulation de croissance des cultures.

➤ *Quels possibles approches pour optimiser le gain de rendement dû à la FM ?*

De cette étude, il a été observé que la combinaison de la FM avec le compost ou le compost-BP réduit l'effet de la FM sur le gain de rendement (son efficacité agronomique) du fait de l'apport relativement élevé de nutriments par ces amendements. Ainsi, il est apparu qu'il serait préférable pour les producteurs ne disposant pas suffisamment d'amendements organiques d'apporter séparément la FM et les amendements organiques (compost et compost-BP) sur différentes superficies. La dose de compost et de compost-BP appliquée dans cette étude a été de 40 g/poquet (1,25 t/ha). Cette approche d'apport séparé de l'engrais et des amendements organiques devrait être analysée par des études complémentaires pour confirmer sa pertinence et sa durabilité à l'échelle des exploitations, et aussi identifier les doses (g/poquet) de compost et de compost + BP permettant d'optimiser le gain rendement à la parcelle de ces amendements organiques.

À l'opposé de la réduction de l'effet de la FM par le compost et le compost-BP associé, il a été observé que l'effet résiduel de précédents apports modérés d'engrais augmente l'effet de la FM. Ces résultats laissent à penser qu'il est possible d'identifier des doses d'amendements organiques qui apporteraient tout juste le niveau de nutriments nécessaires pour booster l'efficacité agronomique de la FM. Cela reviendrait en perspective à rechercher des stratégies visant à apporter de plus petites quantités de compost et de compost-BP ou des amendements organiques de différentes qualités qui fourniraient des niveaux de nutriments équivalents à ce qui est fourni par les effets

résiduels des précédents apports modérés d'engrais. La recherche de ces stratégies devrait inclure la détermination du timing de l'apport des amendements organiques (avant, pendant ou après l'application de la FM) pour lequel la synergie de la combinaison pourrait être observée. Dans l'optique d'un apport combiné de la FM avec des amendements organiques, il faudrait étendre les efforts de développement en cours du microdoseur mécanique pour la FM à un microdoseur mixte engrais et amendements organiques, qui permettrait aux producteurs d'appliquer au besoin séparément ou de façon combinée ces deux types de fertilisants.

Concernant le biochar, l'hypothèse qui a été formulée pour expliquer la faible réponse de la FM appliquée sous forme de biochar macéré est qu'une lente libération des nutriments n'est pas adaptée pour les petits apports d'engrais comme ceux recommandés pour la FM. Des études approfondies sont nécessaires pour mieux comprendre le processus à l'œuvre pour le biochar macéré. Par ailleurs, la tendance à de meilleures réponses observées avec la FM2 (NPK 23 10 05 + urée 46% N) dans la zone agro-climatique de la Sissili, comparées à la FM classique couramment vulgarisée (NPK 14 23 14 + urée 46%) souligne la nécessité de rechercher des formulations de microdosage d'engrais adaptées aux différentes zones agro-oclimatiques du pays.

Références bibliographiques

- Abdalla, E., A. Osman, M. Maki, F. Nur, S. Ali, and J. B. Aune. 2015. The response of sorghum, groundnut, sesame, and cowpea to seed priming and fertilizer micro-dosing in South Kordofan State, Sudan. *Agronomy* 5 (4): 476–90. <https://doi.org/10.3390/agronomy5040476>.
- Abdoulaye, T., and J. H. Sanders. 2005. Stages and Determinants of Fertilizer Use in Semiarid African Agriculture: The Niger Experience. *Agricultural Economics* 32 (2): 167–79. <https://doi.org/10.1111/j.0169-5150.2005.00011.x>.
- Achard, F., and M. Banoin. 2003. Fallows, forage production and nutrient transfers by livestock in Niger. *Nutrient Cycling in Agroecosystems* 65 (2): 183–89.
- Adams, A.M., A.W. Gillespie, G. Kar, S. Koala, B. Ouattara, A.A. Kimaro, A. Bationo, P.B.I. Akponikpe, J.J. Schoenau, and D. Peak. 2016. Long Term Effects of Reduced Fertilizer Rates on Millet Yields and Soil Properties in the West-African Sahel. *Nutrient Cycling in Agroecosystems* 106 (1): 17–29. <https://doi.org/10.1007/s10705-016-9786-x>.
- Adams, D. C., J. Gurevitch, and M. S. Rosenberg. 1997. Resampling tests for meta-analysis of ecological data. *Ecology* 78 (5): 1277–83.
- Agegnehu, G., P.N. Nelson, and M.I. Bird. 2016. Crop Yield, Plant Nutrient Uptake and Soil Physicochemical Properties under Organic Soil Amendments and Nitrogen Fertilization on Nitisols. *Soil and Tillage Research* 160 : 1–13. <https://doi.org/10.1016/j.still.2016.02.003>.
- AGRA. 2014. Achieving Pro-Poor Green Revolution in Dry Lands of Africa : Linking Fertilizer Micro Dosing with Markets to Boost Smallholder Farmers ' Livelihoods in Burkina Faso Final Report AGRA-Microdose Project Mai 2014.”

- AGRA. 2014. Achieving pro-poor green revolution in dry lands of Africa : Linking fertilizer micro dosing with markets to boost smallholder farmers' livelihoods in Burkina Faso. Final report AGRA-microdose project.72. AGRA.
- AGRA. 2017. Africa Agriculture Status Report: The Business of Smallholder Agriculture in Sub-Saharan Africa. Alliance for a Green Revolution in Africa, no. 5: 180. <https://agra.org/aasr2017/preface/>.
- Akponikpè, P.B.I, J. Minet, B. Gérard, P. Defourny, and C. L. Biielders. 2011. Spatial fields' dispersion as a farmer strategy to reduce agro-climatic risk at the household level in pearl millet-based systems in the sahel: A modeling perspective. *Agricultural and Forest Meteorology* 151 (2): 215–27. <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2010.10.007>.
- Akponikpè, P.B.I., K. Michels, and C. L. Biielders. 2008. Integrated Nutrient Management of Pearl Millet in the Sahel Combining Cattle Manure, Crop Residue and Mineral Fertilizer. *Experimental Agriculture* 44 (4): 453–72. <https://doi.org/10.1017/S001447970800673X>.
- Ambouta, JM.K., C. Valentin, and M.C. Laverdière 1996. Jachères et Croûtes d'érosion Au Sahel. *Sécheresse* 7: 269–75.
- Amouzou, K.A., J.B. Naab, J.P.A. Lamers, and M. Becker. 2018. Productivity and nutrient use efficiency of maize, sorghum, and cotton in the West African dry savanna. *Journal of Plant Nutrition and Soil Science* 181 (2): 261–74. <https://doi.org/10.1002/jpln.201700139>.
- An, X., Z. Wu, X. Liu, W. Shi, F. Tian, and B. Yu. 2021. A New Class of Biochar-Based Slow-Release Phosphorus Fertilizers with High Water Retention Based on Integrated Co-Pyrolysis and Co-Polymerization. *Chemosphere* 285 (July): 131481. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2021.131481>.

- Apori, S.O., J. Byalebeka, M. Murongo, J. Ssekandi, and G.L. Noel. 2021. Effect of Co-Applied Corncob Biochar with Farmyard Manure and NPK Fertilizer on Tropical Soil. *Resources, Environment and Sustainability* 5 (December 2020): 100034. <https://doi.org/10.1016/j.resenv.2021.100034>.
- Aune, J.B., A. Coulibaly, and K. E. Giller. 2017. Precision Farming for Increased Land and Labour Productivity in Semi-Arid West Africa. A Review. *Agronomy for Sustainable Development* 37 (3). <https://doi.org/10.1007/s13593-017-0424-z>.
- Aune, J.B., and A. Bationo. 2008. Agricultural intensification in the sahel - The ladder approach. *Agricultural Systems* 98 (2): 119–25. <https://doi.org/10.1016/j.agsy.2008.05.002>.
- Aune, J.B., and A. Ousman. 2011. Effect of seed priming and micro-dosing of fertilizer on sorghum and pearl millet in western sudan. *Experimental Agriculture* 47 (3): 419–30. <https://doi.org/10.1017/S0014479711000056>.
- Aune, J.B., C.O. Traoré, and S. Mamadou. 2012. Low-cost technologies for improved productivity of dryland farming in mali. *Outlook on Agriculture* 41 (2): 103–8. <https://doi.org/10.5367/oa.2012.0084>.
- Aune, J.B., M. Doumbia, and A. Berthe. 2007. Microfertilizing sorghum and pearl millet in Mali: agronomic, economic and social feasibility. *Outlook on Agriculture* 36 (3): 199–203. <https://doi.org/10.5367/000000007781891504>.
- Bagayoko, M., N. Maman, S. Pale, S. Sirifi, S.J.B. Taonda, S. Traore, and S.C. Mason. 2011. Microdose and N and P fertilizer application rates for pearl millet in West Africa. *African Journal of Agricultural Research* 6 (5): 1141–50. <https://doi.org/10.5897/AJAR10.711>.
- Bationo, A., B. Waswa, J. Kihara, and J. Kimetu. 2007. Advances in Integrated Soil Fertility Management in Sub Saharan Africa : Challenges and Opportunities. *Nutrient Cycling in Agroecosystems*. <https://doi.org/10.1007/s10705-007-9096-4>.

- Bationo, A., F. Lompo, and S. Koala. 1998. Research on nutrient flows and balances in West Africa: State-of-the-art. *Agriculture, Ecosystems and Environment* 71 (1–3): 19–35. [https://doi.org/10.1016/S0167-8809\(98\)00129-7](https://doi.org/10.1016/S0167-8809(98)00129-7).
- Biielders, C.L., and B. Gérard. 2015. Millet response to microdose fertilization in South-Western Niger: Effect of antecedent fertility management and environmental factors. *Field Crops Research* 171: 165–75. <https://doi.org/10.1016/j.fcr.2014.10.008>.
- Buerkert, A., A. Bationo, and K. Dossa. 2000. Mechanisms of Residue Mulch-Induced Cereal Growth Increases in West Africa. *Soil Science Society of America Journal* 64 (1): 346–58. <https://doi.org/10.2136/sssaj2000.641346x>.
- Buerkert, A., and E. Schlecht. 2013. Agricultural Innovations in Small-Scale Farming Systems of Sudano-Sahelian West Africa: Some Prerequisites for Success. *Science et Changements Planétaires - Secheresse* 24 (4): 322–29. <https://doi.org/10.1684/sec.2013.0402>.
- Buerkert, A., H.-P. P. Piepho, and A. Bationo. 2002. Multi-Site Time-Trend Analysis of Soil Fertility Management Effects on Crop Production in Sub-Saharan West Africa. *Experimental Agriculture* 38 (2): 163–83. <https://doi.org/10.1017/S0014479702000236>.
- Buerkert, A., A. Bationo, and H.-P Piepho. 2001. Efficient phosphorus application strategies for increased crop production in sub-Saharan West Africa. *Field Crops Research* 72: 1–15. [https://doi.org/10.1016/S0378-4290\(01\)00166-6](https://doi.org/10.1016/S0378-4290(01)00166-6).
- Bumb, B. L., M. E. Johnson, and P.A. Fuentes. n.d. Policy Options for Improving Regional Fertilizer Markets in West Africa. IFPRI Discussion Papers 01084. <http://www.value-chains.org/dyn/bds/docs/808/IFPRI2011-FertiliserMarketsWestAfrica.pdf>.
- Caldwell, P. M., J. M.J. Ward, N. Miles, and M. D. Laing. 2002. Assessment of the Effects of Fertilizer Applications on Gray Leaf Spot and Yield in Maize. *Plant Disease* 86 (8): 859–66. <https://doi.org/10.1094/PDIS.2002.86.8.859>.

- Camara, B.S., F. Camara, A. Berthe, and A. Oswald. 2013. Micro-Dosing of Fertilizer – a Technology for Farmers’ Needs and Resources. *International Journal of AgriScience* 3 (35): 387–89.
- Camara, B.S., F. Camara, A. Berthe, and A. Oswald. 2013. Micro-Dosing of Fertilizer – a Technology for Farmers’ Needs and Resources. *International Journal of AgriScience* 3 (35): 387–89.
- Casenave, A., and C. Valentin. 1989. *Les États de Surface de La Zone Sahélienne: Influence Sur l’infiltration*. Edited by ORSTOM. Orstom.
- CILSS, 2016. *Livret technique de production du compost*.
- Cissé, D., J.T. Cornelis, M., Traoré, F., Saba, K. Coulibaly, D. Lefebvre, G. Colinet, H.B. Nacro. 2021. Co-Composted Biochar to Decrease Fertilization Rates in Cotton–Maize Rotation in Burkina Faso. *Agronomy Journal*, no. June: 1–11. <https://doi.org/10.1002/agj2.20867>.
- Chianu, Jonas N., Justina N. Chianu, and F.Mairura. 2012. Mineral Fertilizers in the Farming Systems of Sub-Saharan Africa. A Review. *Agronomy for Sustainable Development* 32 (2): 545–66. <https://doi.org/10.1007/s13593-011-0050-0>.
- Chicouène D. 1999. *Evaluation Du Peuplement de Mauvaises Herbes En Végétation à La Parcelle: Aperçu Des Méthodes Utilisables*. Phytoma. *La Défense Des Végétaux* 522: 22–24.
- Chikowo, R., M. Corbeels, P. Mapfumo, P. Tittonell, B. Vanlauwe, and K. E. Giller. 2010. Nitrogen and Phosphorus Capture and Recovery Efficiencies, and Crop Responses to a Range of Soil Fertility Management Strategies in Sub-Saharan Africa. *Nutrient Cycling in Agroecosystems* 88 (1): 59–77. <https://doi.org/10.1007/s10705-009-9303-6>.
- Chipomho, J., J.T. Rugare, S. Mabasa, S. Zingore, A.B. Mashingaidze, and R. Chikowo. 2020. Short-Term Impacts of Soil Nutrient Management on Maize (*Zea Mays* L.) Productivity and Weed Dynamics along a Toposequence in Eastern Zimbabwe. *Heliyon* 6 (10): e05223. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2020.e05223>.

- Chivenge, P., B. Vanlauwe, and J. Six. 2011. Does the Combined Application of Organic and Mineral Nutrient Sources Influence Maize Productivity? A Meta-Analysis. *Plant and Soil*, 1–30. <https://doi.org/10.1007/s11104-010-0626-5>.
- CIMMYT. 1988. *From Agronomic Data to Farmer Recommendations: An Economics Training Manual*. CIMMYT, Mexico, D.F.
- Cobo, Juan Guillermo, Gerd Dercon, and Georg Cadisch. 2010. Nutrient Balances in African Land Use Systems across Different Spatial Scales: A Review of Approaches, Challenges and Progress. *Agriculture, Ecosystems and Environment* 136 (1–2): 1–15. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2009.11.006>.
- CORAF/WECARD. 2011. Micro-dose coupled with micro-credit is a valuable asset for agricultural farmers. (In French) Coraf Action: Newsletter for Agricultural Research and Development in West and Central Africa, 61(4th term), 1-24. CORAF/ WECARD, Dakar.
- Corbeels, M., J. de Graaff, T. H. Ndah, E. Penot, F. Baudron, K. Naudin, N. Andrieu, et al. 2014. Understanding the Impact and Adoption of Conservation Agriculture in Africa: A Multi-Scale Analysis. *Agriculture, Ecosystems and Environment* 187: 155–70. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2013.10.011>.
- Coulibaly, K, E Vall, P Autfray, HB Nacro, and MP Sedogo. 2012. Effets de La Culture Permanente Coton-Maïs Sur l'évolution d'indicateurs de Fertilité Des Sols de l'Ouest Du Burkina Faso. *International Journal of Biological and Chemical Sciences* 6 (3): 1069–80. <https://doi.org/10.4314/ijbcs.v6i3.13>.
- Daouia, Abdelaati, Thibault Laurent, and Hohsuk Noh. 2017. Npbr: A Package for Nonparametric Boundary Regression in R. *Journal of Statistical Software* 79 (9). <https://doi.org/10.18637/jss.v079.i09>.
- Demisie, W. 2018. Fertilizer Microdosing Technology in Sorghum, Millet and Maize Production at Small-Scale Level in Africa: A Review. *International Journal of Advanced Scientific Research & Development* 5 (4): 39. <https://doi.org/10.26836/ijasrd/2018/v5/i4/50407>.

- Diallo, B.M., B.P. I. Akponikpè, T. Abasse, D. Fatondji, and K.E. Agbossou. 2019. Why is the spatial variability of millet yield high at farm level in the Sahel? Implications for research and development. *Arid Land Research and Management* 33 (4): 351–74. <https://doi.org/10.1080/15324982.2019.1625984>.
- Falconnier, G.N., K. Descheemaeker, T.A.V. Mourik, and K.E. Giller. 2016. Unravelling the causes of variability in crop yields and treatment responses for better tailoring of options for sustainable intensification in southern Mali. *Field Crops Research* 187: 113–26. <https://doi.org/10.1016/j.fcr.2015.12.015>.
- FAO & ITPS. 2015. Intergovernmental Technical Panel on Soils. Status of the World's Soil Resources. Intergovernmental Technical Panel on Soils. <http://www.fao.org/3/a-i5199e.pdf>.
- FAO. 2020. The State of Food and Agriculture 2020. Overcoming Water Challenges in Agriculture. FAO.
- FAO. 2021. Food Security and Nutrition in the World the State of Transforming Food Systems for Affordable Healthy Diets. The State of the World. <https://doi.org/10.4060/ca9692en>.
- Farooq, M., Nawaz, A. 2016. Nutrient management in dryland agriculture Systems. In. Farooq M., K.H.M. Siddique, Editors, *Innovations in dryland agriculture*. Springer, Cham, pp. p.115–142. <https://doi.org/10.1007/978-3-319-47928-6>
- Fatondji, D., C. Martius, C.L. Biielders, P.L.G. Vlek, A. Bationo, and B. Gerard. 2006. Effect of planting technique and amendment type on pearl millet yield, nutrient uptake, and water use on degraded land in Niger. *Nutrient Cycling in Agroecosystems* 76 (2–3): 203–
- Fatondji, D., S. JB Taonda, D. Sogodo, S. Mamane, and Z. Zida. 2016. Taking Fertilizer Microdosing to Scale in Sahel. In *Going Beyond Demos to Transform African Agriculture: The Journey of AGRA's Soil Health Program*. Nairobi, Kenya, edited by TH Consulting Ltd. Tiff Harris, 39:53. Kenya: Alliance for a Green Revolution in Africa.

- Fermont, A.M., P.J.A van Asten, P. Tittonell, M.T. van Wijk, and K.E. Giller. 2009. Closing the Cassava Yield Gap: An Analysis from Smallholder Farms in East Africa. *Field Crops Research* 112 (1): 24–36. <https://doi.org/10.1016/j.fcr.2009.01.009>.
- Garrity, D.P., F.K. Akinnifesi, O.C. Ajayi, S.G. Weldesemayat, J.G. Mowo, A. Kalinganire, M. Larwanou, and J. Bayala. 2010. Evergreen Agriculture: A Robust Approach to Sustainable Food Security in Africa. *Food Security* 2 (3): 197–214. <https://doi.org/10.1007/s12571-010-0070-7>.
- Geiger, S.C., A. Manu, and A. Bationo. 1992. Changes in a Sandy Sahelian Soil Following Crop Residue and Fertilizer Additions. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, no. 56: 172–77.
- Gemenet, D.C., C.T. Hash, M.D. Sanogo, O. Sy, R.G. Zangre, W.L. Leiser, and B.I.G. Haussmann. 2015. Phosphorus uptake and utilization efficiency in West African pearl millet inbred lines. *Field Crops Research* 171: 54–66. <https://doi.org/10.1016/j.fcr.2014.11.001>.
- Gemenet, D.C., W.L. Leiser, F. Beggi, L.H. Herrmann, V. Vadez, H.F.W. Rattunde, E. Weltzien, C.T. Hash, A. Buerket, and B.I.G. Haussmann. 2016. Overcoming phosphorus deficiency in West African pearl millet and sorghum production systems: Promising options for crop improvement. *Frontiers in Plant Science* 7: 1–10. <https://doi.org/10.3389/fpls.2016.01389>.
- Gerik, T., B. Bean, and R. Vanderlip. 2003. Sorghum Growth and Development. <https://doi.org/10.2134/agronmonogr58.c8>.
- Giller, K.E., M. Corbeels, J. Nyamangara, B. Triomphe, F. Affholder, E. Scopel, and P. Tittonell. 2011. A research agenda to explore the role of conservation agriculture in African smallholder farming systems. *Field Crops Research* 124 (3): 468–72. <https://doi.org/10.1016/j.fcr.2011.04.010>.

- Graef, H., D. Kiobia, P. Saidia, F. Kahimba, F. Graef, and B. Eichler-Löbermann. 2018. Combined Effects of Biochar and Fertilizer Application on Maize Production in Dependence on the Cultivation Method in a Sub-Humid Climate. *Communications in Soil Science and Plant Analysis* 49 (22): 2905–17. <https://doi.org/10.1080/00103624.2018.1547392>.
- Gram, G., D. Roobroeck, P. Pypers, J. Six, R. Merckx, and B. Vanlauwe. 2020. Combining Organic and Mineral Fertilizers as a Climate-Smart Integrated Soil Fertility Management Practice in Sub-Saharan Africa: A Meta-Analysis. *PLoS ONE* 15 (9 September 2020): 1–30. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0239552>.
- Gurevitch, J., and L.V. Hedges. 1999. Statistical issues in ecological meta-analyses. *Ecology* 80 (4): 1142–49. [https://doi.org/10.1890/00129658\(1999\)080\[1142:SIHEMA\]2.0.CO;2](https://doi.org/10.1890/00129658(1999)080[1142:SIHEMA]2.0.CO;2).
- Haigis, J., A. Wezel, T. Rath, F. Graef, B. Muehlig-Versen, S. Abele, T. Frick, and A. Neef. 1999. An Interdisciplinary approach to evaluate technology options for small scale farming in Niger. In Lawrence, G. Renard, and M. von Oppen, editors, *Evaluation of technical and institutional options for small farmers in West Africa*. Margraf Verlag, Weikersheim, Germany, p. 23–40.
- Hayashi, K., T. Abdoulaye, B. Gerard, and A. Bationo. 2008. Evaluation of Application Timing in Fertilizer Micro-Dosing Technology on Millet Production in Niger, West Africa. *Nutrient Cycling in Agroecosystems* 80 (3): 257–65. <https://doi.org/10.1007/s10705-007-9141-3>.
- Hayashi, K., T. Abdoulaye, B. Gerard, and A. Bationo. 2008. Evaluation of Application Timing in Fertilizer Micro-Dosing Technology on Millet Production in Niger, West Africa. *Nutrient Cycling in Agroecosystems* 80 (3): 257–65. <https://doi.org/10.1007/s10705-007-9141-3>.

- Ibrahim, A, R.C. Abaidoo, D. Fatondji, and A. Opoku. 2015c. Determinants of fertilizer microdosing-induced yield increment of pearl millet on an acid sandy soil. *Experimental Agriculture*, 1–17. <https://doi.org/10.1017/S0014479715000241>.
- Ibrahim, A., D. Pasternak, and D. Fatondji. 2014. Impact of Depth of Placement of Mineral Fertilizer Micro-Dosing on Growth, Yield and Partial Nutrient Balance in Pearl Millet Cropping System in the Sahel. *Journal of Agricultural Science*, 1–10. <https://doi.org/10.1017/S0021859614001075>.
- Ibrahim, A., R.C. Abaidoo, D. Fatondji, and A. Opoku. 2015a. Hill Placement of Manure and Fertilizer Micro-Dosing Improves Yield and Water Use Efficiency in the Sahelian Low Input Millet-Based Cropping System. *Field Crops Research* 180: 29–36. <https://doi.org/10.1016/j.fcr.2015.04.022>.
- Ibrahim, A., R.C. Abaidoo, D. Fatondji, and A. Opoku. 2015b. Integrated Use of Fertilizer Micro-Dosing and Acacia Tumida Mulching Increases Millet Yield and Water Use Efficiency in Sahelian Semi-Arid Environment. *Nutrient Cycling in Agroecosystems* 103 (3): 375–88. <https://doi.org/10.1007/s10705-015-9752-z>.
- Ibrahim, A., R.C. Abaidoo, D. Fatondji, and A. Opoku. 2016. Fertilizer Micro-Dosing Increases Crop Yield in the Sahelian Low-Input Cropping System: A Success with a Shadow. *Soil Science and Plant Nutrition* 62 (3): 277–88. <https://doi.org/10.1080/00380768.2016.1194169>.
- Ichami, S. M., K.D. Shepherd, E. Hoffland, A.M. Sila, and J.J. Stoorvogel. 2019. Fertilizer response and nitrogen use efficiency in african smallholder maize farms. *Nutrient Cycling in Agroecosystems* 113 (1): 1–19. <https://doi.org/10.1007/s10705-018-9958-y>.
- James, Gareth, Daniela Witten, Trevor Hastie, and Robert Tibshirani. 2013. An Introduction to Statistical Learning, with Applications in R. https://doi.org/10.1007/978-1-4614-7138-7_8.

- Jamil, M., T.A. Van Mourik, T. Charnikhova, and H.J. Bouwmeester. 2012. Effect of diammonium phosphate application on strigolactone production and *Striga hermonthica* Infection in Three Sorghum Cultivars. *Weed Research* 53 (2): 121–30. <https://doi.org/10.1111/wre.12003>.
- Johnson, D.W., and P.S. Curtis. 2001. Effects of forest management on soil C and N storage: Meta analysis. *Forest Ecology and Management* 140 (2–3): 227–38. [https://doi.org/10.1016/S0378-1127\(00\)00282-6](https://doi.org/10.1016/S0378-1127(00)00282-6).
- Jones, A., H. Breuning-Madsen, M. Brossard, J. Chapelle, A. Dampha, J. Deckers, O. Dewitte, et al. 2015. *Atlas Des Sols D ' Afrique*. Commission européenne, Bureau des publications de l'Union européenne, Luxembourg. 176 pp
- Kamanga, B.C.G., S.R. Waddington, A.M. Whitbread, C. J.M. Almekinders, and K. E. Giller. 2014. Improving the Efficiency of Use of Small Amounts of Nitrogen and Phosphorus Fertiliser on Smallholder Maize in Central Malawi. *Experimental Agriculture* 50 (02): 229–49. <https://doi.org/10.1017/S0014479713000513>.
- Kamau, S., N.K. Karanja, F.O. Ayuke, and J. Lehmann. 2019. Short-Term Influence of Biochar and Fertilizer-Biochar Blends on Soil Nutrients, Fauna and Maize Growth. *Biology and Fertility of Soils* 55 (7): 661–73. <https://doi.org/10.1007/s00374-019-01381-8>.
- Kätterer, T., D. Roobroeck, O. Andrén, G. Kimutai, E. Karlton, H. Kirchmann, G. Nyberg, B. Vanlauwe, and K. Röing de Nowina. 2019. Biochar Addition Persistently Increased Soil Fertility and Yields in Maize-Soybean Rotations over 10 Years in Sub-Humid Regions of Kenya. *Field Crops Research* 235 (February): 18–26. <https://doi.org/10.1016/j.fcr.2019.02.015>.
- Khan, Zeyaur R., Charles A.O. Midega, Jimmy O. Pittchar, Alice W. Murage, Michael A. Birkett, T.J.A. Bruce, and John A. Pickett. 2014. Achieving Food Security for One Million Sub-Saharan African Poor through Push-Pull Innovation by 2020. *Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences* 369 (1639). <https://doi.org/10.1098/rstb.2012.0284>.

- Khan, Zeyaur R., Charles A.O. Midega, Toby J.A. Bruce, Antony M. Hooper, and John A. Pickett. 2010. Exploiting Phytochemicals for Developing a ‘push-Pull’ Crop Protection Strategy for Cereal Farmers in Africa. *Journal of Experimental Botany* 61 (15): 4185–96. <https://doi.org/10.1093/jxb/erq229>.
- Kihara, J., B. Vanlauwe, B. Waswa, J. M. Kimetu, J. Chianu, and Andre Bationo. 2010. Strategic Phosphorus Application in Legume-Cereal Rotations Increases Land Productivity and Profitability in Western Kenya. *Experimental Agriculture* 46 (1): 35–52. <https://doi.org/10.1017/S0014479709990810>.
- Kihara, J., G. Nziguheba, S. Zingore, A. Coulibaly, A. Esilaba, V. Kabambe, S. Njoroge, C. Palm, and J. Huising. 2016. Understanding Variability in Crop Response to Fertilizer and Amendments in Sub-Saharan Africa. *Agriculture, Ecosystems and Environment* 229: 1–12. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2016.05.012>.
- Kim, P., D. Hensley, and N. Labbé. 2014. Nutrient Release from Switchgrass-Derived Biochar Pellets Embedded with Fertilizers. *Geoderma* 232–234: 341–51. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2014.05.017>.
- Kisinyo, P. O., P. A. Opala, V. Palapala, S. O. Gudu, C. O. Othieno, and E. Ouma. 2015. Micro-Dosing of Lime, Phosphorus and Nitrogen Fertilizers Effect on Maize Performance on an Acid Soil in Kenya. *Sustainable Agriculture Research* 4 (2): 21. <https://doi.org/10.5539/sar.v4n2p21>.
- Kissou, R., E. Traoré, Z. Gnankambary, H.B. Nacro, and M.P. Sédogo. 2014. Connaissance Endogène de La Classification et de La Fertilité Des Sols En Zone Sud-Soudannienne Du Burkina Faso. *VertigO - La Revue Électronique En Sciences de l’environnement* 14 (1): 1–16. <https://doi.org/10.4000/vertigo.10886>.
- Kissou, R., Z. Gnankambary, H.B. Nacro, and M.P. Sedogo. 2018. Classification Locale et Utilisation Des Sols En Zone Sahélienne Au Burkina Faso. *International Journal of Biological and Chemical Sciences* 12 (1): 610. <https://doi.org/10.4314/ijbcs.v12i1.46>.

- Kotir, J.H. 2011. Climate Change and Variability in Sub-Saharan Africa : A Review of Current and Future Trends and Impacts on Agriculture and Food Security, 587–605. <https://doi.org/10.1007/s10668-010-9278-0>.
- Koussoubé, E., and C. Nauges. 2017. Returns to Fertiliser Use: Does It Pay Enough? Some New Evidence from Sub-Saharan Africa. *European Review of Agricultural Economics* 44 (2): 183–210. <https://doi.org/10.1093/erae/jbw018>.
- Kravchenko, A.N., G.P. Robertson, K.D. Thelen, and R.R. Harwood. 2005. Management, topographical, and weather effects on spatial variability of crop Grain yields. *Agronomy Journal* 97: 514–523.
- Kurwakumire, N., R. Chikowo, F. Mtambanengwe, P. Mapfumo, S. Snapp, A. Johnston, and S. Zingore. 2014. Maize Productivity and Nutrient and Water Use Efficiencies across Soil Fertility Domains on Smallholder Farms in Zimbabwe. *Field Crops Research* 164 (1): 136–47. <https://doi.org/10.1016/j.fcr.2014.05.013>.
- Kuyah, S., G. W. Sileshi, L. Nkurunziza, N. Chirinda, P. C. Ndayisaba, K. Dimobe, and I. Öborn. 2021. Innovative Agronomic Practices for Sustainable Intensification in Sub-Saharan Africa: A Review,no. February. <https://doi.org/10.1007/s13593-021-00673-4>.
- Lajeunesse, M.J. 2013. Recovering missing or partial data from studies: a survey of conversions and imputations for meta-analysis. In Koricheva J., J. Gurevitch, and K.L. Mengersen, editors. *Handbook of meta-analysis in ecology and evolution*. Princeton University Press, Princeton, New Jersey, USA
- Lal, R. 2015. Sustainable Intensification for Adaptation and Mitigation of Climate Change and Advancement of Food Security in Africa.In *Sustainable Intensification to Advance Food Security and Enhance Climate Resilience in Africa*, edited by R. Lal, B. R. Singh, D. L. Mwaseba, D. Kraybill, D. O. Hansen, and L. O. Eik, 235–53. Springer. https://doi.org/10.1007/978-3-319-09360-4_12.

- Lamers, J., and P.R. Feil. 1995. Farmer's knowledge and management of spatial soil and crop growth variability in Niger. *Netherlands Journal of Agricultural Sciences* 43: 375–89.
- Le Barbe, L., T. Lebel, and D. Tapsoba. 2002. Rainfall Variability in West Africa during the Years 1950 – 90. *American Meteorological Society* 15: 187–202.
- Leiser, W.L., H.F.W. Rattunde, E. Weltzien, and B.I.G. Haussmann. 2014. Phosphorus uptake and use efficiency of diverse West and Central African sorghum Genotypes under field conditions in Mali. *Plant and Soil* 377 (1–2): 383–94. <https://doi.org/10.1007/s11104-013-1978-4>.
- Liu, C.A., F.R. Li, L. M. Zhou, R.H. Zhang, Yu-Jia, S.L. Lin, Li.J. Wang, K.H.M. Siddique, and F.M. Li. 2013. Effect of Organic Manure and Fertilizer on Soil Water and Crop Yields in Newly-Built Terraces with Loess Soils in a Semi-Arid Environment. *Agricultural Water Management* 117: 123–32. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2012.11.002>.
- MAAH. 2020. *Annuaire Des Statistiques Agricoles*. Direction Générale Des Études et Des Statistiques Sectoriels. Ouagadougou (Bukina Faso)
- Magdoff, F. and Vans Es H. 2021. *Building Soils for Better Crops, Ecological Management for Healthy Soils*, Fourth Edition. Sustainable Agriculture Research and Education (SARE). <https://doi.org/10.1097/00010694-199311000-00014>.
- Manu, A., A. Bationo, and S.C. Geiger. 1991. Fertility status of selected millet producing soils of West Africa with emphasis on phosphorous. *Soil Science* 152 (5): 315–20. <https://doi.org/10.1097/00010694-199111000-00001>.
- Manyame, C. 2006. On-farm yield and water use response of pearl millet to different management practices in Niger. Ph.D. Diss., Texas A&M University, Texas.

- Margenot, A., B.R. Singh, I.M. Rao, and R. Sommer. 2016. Phosphorus Fertilization and Management in Soils of Sub-Saharan Africa. In R. Lal Stewart, B.A. (Eds.), *Soil Phosphorus* (Pp. 151–208). Boca Raton, FL: CRC Press. In *Soil Phosphorus*, edited by B.A. (Eds.) R. Lal Stewart, 151–208. CRC Press, Boca Raton/Florida.
- Mashingaidze, N., P. Belder, S. Twomlow, L. Hove, and M. Moyo. 2013. Improving maize (*Zea Mays* L.) performance in semi-arid Zimbabwe through micro-dosing with ammonium nitrate tablets. *Experimental Agriculture* 49 (2): 179–96. <https://doi.org/10.1017/S0014479712001020>.
- Masvaya, E.N., J. Nyamangara, R.W. Nyawasha, S. Zingore, R. Delve, and K.E. Giller. 2010. Effect of farmer management strategies on spatial variability of soil fertility and crop nutrient uptake in contrasting agro-ecological zones in Zimbabwe. *Nutrient Cycling in Agroecosystems* 88 (1): 111–20. <https://doi.org/10.1007/s10705-009-9262-y>.
- Muehlig-versen, B., A. Buerkert, A. Bationo, and V. Roemheld. 2003. Phosphorus Placement on Acid Arenosols of the West African Sahel. *Experimental Agriculture* 39 (3): 307–25. <https://doi.org/10.1017/S0014479703001261>.
- Mueller, Nathaniel D., James S. Gerber, Matt Johnston, Deepak K. Ray, Navin Ramankutty, and Jonathan A. Foley. 2012. Closing Yield Gaps through Nutrient and Water Management. *Nature* 490 (7419): 254–57. <https://doi.org/10.1038/nature11420>.
- Murendo, C., and M. Wollni. 2015. Ex-Post Impact Assessment of Fertilizer Microdosing as a Climate-Smart Technology in Sub-Saharan Africa
- Ncube, B., J. P. Dimes, S. Twomlow, W. Mupangwa, and K.E. Giller. 2007. Raising the Productivity of Smallholder Farms under Semi-Arid Conditions by Use of Small Doses of Manure and Nitrogen: A Case of Participatory Research. *Nutrient Cycling in Agroecosystems* 77 (1): 53–67. <https://doi.org/10.1007/s10705-006-9045-7>.

- Njoroge, R., A.N. Otinga, J.R. Okalebo, M. Pepela, and R. Merckx. 2017b. Occurrence of Poorly Responsive Soils in Western Kenya and Associated Nutrient Imbalances in Maize (*Zea Mays* L.). *Field Crops Research* 210: 162–74. <https://doi.org/10.1016/j.fcr.2017.05.015>.
- Njoroge, S., A.G.T. Schut, K.E. Giller, and S. Zingore. 2017a. Strong Spatial-Temporal Patterns in Maize Yield Response to Nutrient Additions in African Smallholder Farms. *Field Crops Research* 214: 321–30. <https://doi.org/10.1016/j.fcr.2017.09.026>.
- Nkebiwe, P. M., M. Weinmann, A. Bar-Tal, and T. Müller. 2016. Fertilizer placement to improve crop nutrient acquisition and yield: A review and meta-analysis. *Field Crops Research* 196: 389–401. <https://doi.org/10.1016/j.fcr.2016.07.018>.
- Nwoke, O.C., B. Vanlauwe, J. Diels, N. Sanginga, O. Osonubi, and R. Merckx. 2003. Assessment of labile phosphorus fractions and adsorption characteristics in relation to soil Properties of West African savanna soils. *Agriculture, Ecosystems and Environment* 100 (2–3): 285–94. [https://doi.org/10.1016/S0167-8809\(03\)00186-5](https://doi.org/10.1016/S0167-8809(03)00186-5).
- Nyamangara, J., E. Makarimayi, E.N. Masvaya, S. Zingore, and R.J. Delve. 2011. Effect of Soil Fertility Management Strategies and Resource-Endowment on Spatial Soil Fertility Gradients, Plant Nutrient Uptake and Maize Growth at Two Smallholder Areas, North-Western Zimbabwe. *South African Journal of Plant and Soil* 28 (1): 1–10. <https://doi.org/10.1080/02571862.2011.10640006>.
- Okebalama, C.B., A. Ibrahim, E.Y Safo, E. Yeboah, R.C. Abaidoo, V. Logah, and Uzoh, I.M. 2017. Fertilizer Micro-Dosing in West African Low-Input Cereals Cropping: Benefits, Challenges and Improvement Strategies. *African Journal of Agricultural Research* 12 (14): 1169–76. <https://doi.org/10.5897/ajar2016.11559>.
- Okebalama, C.B., E.Y. Safo, E. Yeboah, R.C. Abaidoo, and V. Logah. 2016. Fertilizer microdosing in the humid forest zone of Ghana: An efficient strategy for increasing maize Yield and income in smallholder farming. *Soil Science Society of America Journal* 80 (5): 1254–61. <https://doi.org/10.2136/sssaj2016.03.0065>.

- Opala, P.A., B. A. Jama, C. O. Othieno, and J. R. Okalebo. 2007. Effect of phosphate fertilizer application methods and nitrogen sources on maize in Western Kenya: An agronomic and economic evaluation. *Experimental Agriculture* 43 (4): 477–87. <https://doi.org/10.1017/S0014479707005315>.
- Ouedraogo, Y., JB.S. Taonda, I. Sermé, B. Tychon, and C.L. Biélders. 2020. Factors Driving Cereal Response to Fertilizer Microdosing in Sub-Saharan Africa: A Meta-Analysis. *Agronomy Journal*, no. July 2019: 2418–31. <https://doi.org/10.1002/agj2.20229>.
- Oxford Business Group and OCP. 2021. *Agriculture in Africa*. https://doi.org/10.11619/africa1964.1987.31_61.
- Palé, S., S.C. Mason, and JB. S.Taonda. 2009. Water and Fertilizer Influence on Yield of Grain Sorghum Varieties Produced in Burkina Faso. *South African Journal of Plant and Soil* 26 (2): 91–97. <https://doi.org/10.1080/02571862.2009.10639939>.
- Palm, C.A., C.N. Gachengo, R.J. Delve, G. Cadisch, and K.E. Giller. 2001. Organic Inputs for Soil Fertility Management in Tropical Agroecosystems: Application of an Organic Resource Database. *Agriculture, Ecosystems and Environment* 83 (1–2): 27–42. [https://doi.org/10.1016/S0167-8809\(00\)00267-X](https://doi.org/10.1016/S0167-8809(00)00267-X).
- PANA. 2007. Plan d’action National d’adaptation à La Variabilité Aux et Changement Climatiques Du Burkina Faso.Ouagadougou.
- Philibert, A., C. Loyce, and D. Makowski. 2012. Assessment of the quality of meta-analysis in agronomy. *Agriculture, Ecosystems and Environment* 148: 72–82. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2011.12.003>.
- Phiri, A.D.K., G.Y. Kanyama-Phiri, and S. Snapp. 1999. Maize and Sesbania Production in Relay Cropping at Three Landscape Positions in Malawi. *Agroforestry Systems* 47 (1–3): 153–62. <http://www.scopus.com/inward/record.url?eid=2-s2.0-0033403189&partnerID=40&md5=bf55489e010a3459ec9647585f6b2ee0>.
- PNDES. 2021. Plan National de Développement Économique et Social (PNDES-II) 2021-2025.Ouagadougou (Bukina Faso).

- Prudencio, C.Y. 1993. Ring Management of Soils and Crops in the West African Semi-Arid Tropics: The Case of the Mossi Farming System in Burkina Faso. *Agriculture, Ecosystems & Environment* 47 (3): 237–64. [https://doi.org/10.1016/0167-8809\(93\)90125-9](https://doi.org/10.1016/0167-8809(93)90125-9).
- Rockström, J., J. Barron, J. Brouwer, S. Galle, and A. De Rouw. 1999. On-Farm Spatial and Temporal Variability of Soil and Water in Pearl Millet Cultivation. *Soil Science Society of America Journal* 63 (5): 1308–19. <https://doi.org/10.2136/sssaj1999.6351308x>.
- Ronner, E., A.C. Franke, B. Vanlauwe, M. Dianda, E. Edeh, B. Ukem, A. Bala, J. van Heerwaarden, and K.E. Giller. 2015. Understanding Variability in Soybean Yield and Response to P-Fertilizer and Rhizobium Inoculants on Farmers' Fields in Northern Nigeria. *Field Crops Research*, 1–13. <https://doi.org/10.1016/j.fcr.2015.10.023>.
- Roobroeck, D., C. A. Palm, G. Nziguheba, R. Weil, and B. Vanlauwe. 2021. Assessing and Understanding Non-Responsiveness of Maize and Soybean to Fertilizer Applications in African Smallholder Farms. *Agriculture, Ecosystems and Environment* 305 (October 2020): 107165. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2020.107165>.
- Roose, E. 1993. Capacité des Jachères à restaurer la fertilité des sols pauvres en zone soudano-sahélienne d'Afrique occidentale. In *La Jachère En Afrique de l'Ouest*. Collection Colloques et Séminaires. ORSTOM, Paris.
- Saba, F., S.J.B. Taonda, I. Serme, A.A. Bandaogo, A.P. Sourwema, and A. Kabre. 2018. Effects of fertilizer microdosing on cowpea, millet and sorghum production as a function of the toposequence. (In French with English abstract). *International Journal of Biological and Chemical Sciences*, 1–11. <https://doi.org/10.4314/ijbcs.v11i5.12>.
- Samaké, O., E.M.A. Smaling, M.J. Kropff, T.J. Stomph, and A. Kodio. 2005. Effects of Cultivation Practices on Spatial Variation of Soil Fertility and Millet Yields in the Sahel of Mali. *Agriculture, Ecosystems and Environment* 109 (3–4): 335–45. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2005.02.024>.

- Sanchez, P.A. 2002. Soil Fertility and Hunger in Africa. *Science* 295 (5562): 2019–20. <https://doi.org/10.1126/science.1065256>.
- Sanginga, N., and P.L. Woomer. 2009. Integrated Soil Management in Africa, Principles, Practices and Development at Process. Tropical Soil Biology and Fertility Institute of the International Centre for Tropical Agriculture (TSBF-CIAT). Nairobi: Tropical Soil Biology and Fertility Institute of the International Centre for Tropical Agriculture (TSBF-CIAT).
- Schlecht E., P. Hiernaux., M.D. Turner 2001. Livestock mobility: necessity and alternatives. (In French). In: Tielkes E., E. Schlecht, and P. Hiernaux, editors, *Elevage, gestion des parcours et implications pour le développement au sahel*. Verlag Grauer, Stuttgart-Beuren, p. 65–78.
- Sermé, I., B. Tarfa, K. Ouattara, and C. Wortmann. 2020. Maize Response to Applied Nutrients for West African Savannas. *Agronomy Journal*, no. November 2019: 1–10. <https://doi.org/10.1002/agj2.20152>.
- Serme, I., K. Ouattara, A.A. Bandaogo, and C. Wortmann. 2018. Pearl millet and sorghum yield response to fertilizer in the sahel of Burkina Faso. *Journal of Agricultural Studies* 6 (1): 176–88. <https://doi.org/10.5296/jas.v6i1.12384>.
- Serpantié, G., and B. Ouattara. 2001. Fertilité et Jachères En Afrique de l' Ouest. In *La Jachère En Afrique Tropicale: Rôles, Aménagement, Alternatives: 2. De La Jachère Naturelle à La Jachère Améliorée: Le Point Des Connaissances.*, edited by C. Floret and R. Pontannier, 21–83. Paris (FRA): Paris (FRA); Montrouge: IRD; J. Libbey.
- Shatar, T. M., and A. B. Mcbratney. 2004. Boundary-Line Analysis of Field-Scale Yield Response to Soil Properties. *Journal of Agricultural Science* 142 (5): 553–60. <https://doi.org/10.1017/S0021859604004642>.
- Sheahan, M., and .C. B. Barrett. 2017. Ten Striking Facts about Agricultural Input Use in Sub-Saharan Africa. *Food Policy* 67: 12–25. <https://doi.org/10.1016/j.foodpol.2016.09.010>.

- Sileshi, G.W., B. Jama, B. Vanlauwe, W. Negassa, R. Harawa, A. Kiwia, and D. Kimani. 2019. Nutrient use efficiency and crop yield response to the combined application of cattle manure and inorganic fertilizer in sub-Saharan Africa. *Nutrient Cycling in Agroecosystems* 113 (2): 181–99. <https://doi.org/10.1007/s10705-019-09974-3>.
- Sime, G., and J.B. Aune. 2014. Maize response to fertilizer dosing at three sites in the Central rift valley of Ethiopia. *Agronomy* 4 (3): 436–51. <https://doi.org/10.3390/agronomy4030436>.
- Somda, B.B., B. Ouattara, I. Serme, M. B. Pouya, F. Lompo, S. JB. Taonda, and P. M. Sedogo. 2017. Détermination Des Doses Optimales de Fumures Organo-Minérales En Microdose Dans La Zone Soudano-Sahélienne Du Burkina Faso. *International Journal of Biological and Chemical Sciences* 11 (2): 670. <https://doi.org/10.4314/ijbcs.v11i2.11>.
- Sommer, R., D. Bossio, L. Desta, J. Dimes, J. Kihara, S. Koala, N. Mango, D. Rodriguez, C. Thierfelder, and L. Winowiecki. 2013. Profitable and sustainable nutrient management systems for East and Southern African smallholder farming systems—challenges and opportunities. Working Paper. 91. CIAT, Cali, Columbia. <https://doi.org/10.13140/2.1.3137.4405>.
- Sultan, B., and M. Gaetani. 2016. Agriculture in West Africa in the Twenty-First Century: Climate Change and Impacts Scenarios, and Potential for Adaptation. *Frontiers in Plant Science* 7 (Augus 2016): 1–20. <https://doi.org/10.3389/fpls.2016.01262>.
- Tabo, R., A. Bationo, B. Amadou, D. Marchal, F. Lompo, M. Gandah, O. Hassane, et al. 2011. Fertilizer Microdosing and ‘Warrantage’ or Inventory Credit System to Improve Food Security and Farmers’ Income in West Africa. *Innovations as Key to the Green Revolution in Africa*, 113–21. https://doi.org/10.1007/978-90-481-2543-2_10.

- Tabo, R., A. Bationo, B. Amadou, D. Marchal, F. Lompo, M. Gandah, O. Hassane, et al. 2011. Fertilizer Microdosing and ‘Warrantage’ or Inventory Credit System to Improve Food Security and Farmers’ Income in West Africa. In *Innovations as Key to the Green Revolution in Africa*, edited by A. Bationo, B. Waswa, J. Okeyo, F. Maina, and J Kihara, 113–21. Dordrecht: Springer. https://doi.org/10.1007/978-90-481-2543-2_10.
- Taonda, Jean-Baptiste S., Emmanuel Compaoré, and Nongma Zongo. 2015. Guide de Formation En Technique de Microdose.”
- Thigpen, L. L. 2006. African Fertilizer Summit Proceedings”, Abuja. 5–9 July. Muscle Shoals, AL: IFDC.
- Tittonell, P., B. Vanlauwe, N. de Ridder, and K. E. Giller. 2007. Heterogeneity of Crop Productivity and Resource Use Efficiency within Smallholder Kenyan Farms: Soil Fertility Gradients or Management Intensity Gradients? *Agricultural Systems* 94 (2): 376–90. <https://doi.org/10.1016/j.agsy.2006.10.012>.
- Tittonell, P., B. Vanlauwe, P.A. Leffelaar, K.D. Shepherd, and K.E. Giller. 2005. Exploring Diversity in Soil Fertility Management of Smallholder Farms in Western Kenya: II. Within-Farm Variability in Resource Allocation, Nutrient Flows and Soil Fertility Status. *Agriculture, Ecosystems and Environment* 110 (3–4): 166–84. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2005.04.003>.
- Tonitto, C., and J.E. Ricker-Gilbert. 2016. Nutrient Management in African Sorghum Cropping Systems: Applying Meta-Analysis to Assess Yield and Profitability. *Agronomy for Sustainable Development* 36 (1): 1–19. <https://doi.org/10.1007/s13593-015-0336-8>.
- Tonitto, C., and J.E. Ricker-Gilbert. 2016. Nutrient Management in African Sorghum Cropping Systems: Applying Meta-Analysis to Assess Yield and Profitability. *Agronomy for Sustainable Development* 36 (1): 1–19. <https://doi.org/10.1007/s13593-015-0336-8>.

- Tovihoudji, P.G., P.B.I. Akponikpè, E.K. Agbossou, and C. L. Biielders. 2019. Variability in Maize Yield and Profitability Following Hill-Placement of Reduced Mineral Fertilizer and Manure Rates under Smallholder Farm Conditions in Northern Benin. *Field Crops Research* 230: 139–50. <https://doi.org/10.1016/j.fcr.2018.10.018>.
- Tovihoudji, P.G., P.B.I. Akponikpè, E.K. Agbossou, P. Bertin, and C.L. Biielders. 2017. Fertilizer Microdosing Enhances Maize Yields but May Exacerbate Nutrient Mining in Maize Cropping Systems in Northern Benin. *Field Crops Research* 213: 130–42.
- Traore, B., M.T. Van Wijk, K. Descheemaeker, M. Corbeels, M.C. Rufino, and K.E. Giller. 2015. Climate variability and change in Southern Mali: Learning from farmer perceptions and on farm trials. *Experimental Agriculture* 51 (4): 615–34. <https://doi.org/10.1017/S0014479714000507>.
- Twomlow, S., D. Rohrbach, J. Dimes, J. Rusike, W. Mupangwa, B. Ncube, L. Hove, M. Moyo, N. Mashingaidze, and P. Mahposa. 2010. Micro-Dosing as a Pathway to Africa’s Green Revolution: Evidence from Broad-Scale on-Farm Trials. *Nutrient Cycling in Agroecosystems* 88 (1): 3–15. <https://doi.org/10.1007/s10705-008-9200-4>.
- Twomlow, S., D. Rohrbach, J. Rusike, W. Mupangwa, J. Dimes, and B. Ncube. 2006. Spreading the Word on Fertilizer in Zimbabwe. Global theme on agroecosystems, report no. 24. PO Box 776, Bulawayo, Zimbabwe, International Crops Research Institute for the Semi-Arid Tropics, 16 pp.
- Van der Velde, M., L. See, L. You, J. Balkovič, S. Fritz, N. Khabarov, M. Obersteiner, and S. Wood. 2013. Affordable Nutrient Solutions for Improved Food Security as Evidenced by Crop Trials. *PLoS ONE* 8 (4): e60075. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0060075>.
- Van Ittersum, M. K., L.G.J. Van Bussel, J. Walof, P. Grassini, J. Van Wart, N. Guilpart, L. Claessens, et al. 2016. Can Sub-Saharan Africa Feed Itself ? *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America* 113 (52): 14964–69. <https://doi.org/10.1073/pnas.1610359113>.

- Vanlauwe, B., A. Bationo, J. Chianu, K. E. Giller, R. Merckx, U. Mokwunye, O. Ohiokpehai, et al. 2010. Integrated Soil Fertility Management: Operational Definition and Consequences for Implementation and Dissemination. *Outlook on Agriculture* 39 (1): 17–24. <https://doi.org/10.5367/000000010791169998>.
- Vanlauwe, B., and K. E. Giller. 2006. Popular Myths around Soil Fertility Management in Sub-Saharan Africa. *Agriculture, Ecosystems and Environment* 116 (1–2): 34–46. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2006.03.016>.
- Vanlauwe, B., C.A. Palm, H.K. Murwira, R. Merckx, and R. Delve. 2002b. Organic Resource Management in Sub-Saharan Africa: Validation of a Residue Quality-Driven Decision Support System. *Agronomie* 23 (May 2014): 407–18. <https://doi.org/10.1051/agro>.
- Vanlauwe, B., D. Coyne, J. Gockowski, S. Hauser, J. Huising, C. Masso, G. Nziguheba, M. Schut, and P. Van Asten. 2014a. Sustainable Intensification and the African Smallholder Farmer. *Current Opinion in Environmental Sustainability* 8: 15–22. <https://doi.org/10.1016/j.cosust.2014.06.001>.
- Vanlauwe, B., J. Diels, O. Lyasse, K. Aihou, E.N.O. Iwuafor, N. Sanginga, R. Merckx, and J. Deckers. 2002. Fertility Status of Soils of the Derived Savanna and Northern Guinea Savanna and Response to Major Plant Nutrients, as Influenced by Soil Type and Land Use Management. *Nutrient Cycling in Agroecosystems* 62 (2): 139–50. <https://doi.org/10.1023/A:1015531123854>.
- Vanlauwe, B., J. Kihara, P. Chivenge, P. Pypers, R. Coe, and J. Six. 2011. Agronomic Use Efficiency of N Fertilizer in Maize-Based Systems in Sub-Saharan Africa within the Context of Integrated Soil Fertility Management. *Plant and Soil* 339 (1): 35–50. <https://doi.org/10.1007/s11104-010-0462-7>.
- Vanlauwe, B., J. Wendt, and J. Diels. 2001. Combined Application of Organic Matter and Fertilizer. In *Sustaining Soil Fertility in West Africa*, 247–79. madison: Society of America and American Society of Agronomy, 677 S. Segoe Rd., Madison, WI 53711, USA. <https://doi.org/10.2136/sssaspecpub58.ch12>.

- Vanlauwe, B., J. Wendt, K. E. Giller, M. Corbeels, B. Gerard, and C. Nolte. 2014b. A Fourth Principle Is Required to Define Conservation Agriculture in Sub-Saharan Africa: The Appropriate Use of Fertilizer to Enhance Crop Productivity. *Field Crops Research* 155: 10–13. <https://doi.org/10.1016/j.fcr.2013.10.002>.
- Vanlauwe, B., K. Descheemaeker, K. E. Giller, J. Huising, R. Merckx, G. Nziguheba, J. Wendt, and S. Zingore. 2015. Integrated Soil Fertility Management in Sub-Saharan Africa: Unravelling Local Adaptation. *Soil* 1 (1): 491–508. <https://doi.org/10.5194/soil-1-491-2015>.
- Vanlauwe, B., P. Tittonell, and J. Mukalama. 2006. Within-farm soil fertility gradients affect response of maize to fertiliser application in Western Kenya. *Nutrient Cycling in Agroecosystems* 76 (2–3): 171–82. <https://doi.org/10.1007/s10705-005-8314-1>.
- Vanlauwe, B., R. Coe, and K.E. Giller. 2016. Beyond Averages: New Approaches to Understand Heterogeneity and Risk of Technology Success or Failure in Smallholder Farming. *Experimental Agriculture* 55 (S1): 84–106. <https://doi.org/10.1017/S0014479716000193>.
- Voortman, R.L., J. Brouwer, and P.J. Albersen. 2004. Characterization of Spatial Soil Variability and Its Effect on Millet Yield on Sudano-Sahelian Coversands in SW Niger. *Geoderma* 121 (1–2): 65–82. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2003.10.006>.
- Waddington, S.R., X. Li, J. Dixon, G. Hyman, and M.C. de Vicente. 2010. Getting the Focus Right: Production Constraints for Six Major Food Crops in Asian and African Farming Systems. *Food Security* 2 (1): 27–48. <https://doi.org/10.1007/s12571-010-0053-8>.
- Wallace, B.C., M.J. Lajeunesse, G. Dietz, I.J. Dahabreh, T.A. Trikalinos, C.H. Schmid, and J. Gurevitch. 2017. OpenMEE : Intuitive, open-source software for meta-analysis in ecology and evolutionary biology. *Methods in Ecology and Evolution* 8: 941–47. <https://doi.org/10.1111/2041-210X.12708>.

- Wortman, S.E., A.A. Holmes, E. Miernicki, K. Knoche, and C.M. Pittelkow. 2017. First-season crop yield response to organic soil amendments: A meta-analysis. *Agronomy Journal* 109 (4): 1210–17. <https://doi.org/10.2134/agronj2016.10.0627>.
- Yanggen, D., V. Kelly, T. Reardon, and A. Naseem. 1998. Incentives for fertilizer use in sub-Saharan Africa : A review of empirical evidence on fertilizer response and profitability. International Development Working Paper No. 70. Department of Agricultural Economics Department of Economics, Michigan State University, East Lansing, Michigan.
- Zhao, L., X. Cao, W. Zheng, J.W. Scott, B.K. Sharma, and X. Chen. 2016. Copyrolysis of Biomass with Phosphate Fertilizers to Improve Biochar Carbon Retention, Slow Nutrient Release, and Stabilize Heavy Metals in Soil. *ACS Sustainable Chemistry and Engineering* 4 (3): 1630–36. <https://doi.org/10.1021/acssuschemeng.5b01570>.
- Zingore, S., H. K. Murwira, R. J. Delve, and K. E. Giller. 2007a. Soil Type, Management History and Current Resource Allocation: Three Dimensions Regulating Variability in Crop Productivity on African Smallholder Farms. *Field Crops Research*. <https://doi.org/10.1016/j.fcr.2006.12.006>.
- Zingore, S., H.K. Murwira, R.J. Delve, and K.E. Giller. 2007b. Influence of Nutrient Management Strategies on Variability of Soil Fertility, Crop Yields and Nutrient Balances on Smallholder Farms in Zimbabwe. *Agriculture, Ecosystems and Environment* 119 (1–2): 112–26. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2006.06.019>.
- Zingore, S., R.J. Delve, J. Nyamangara, and K.E. Giller. 2008. Multiple Benefits of Manure: The Key to Maintenance of Soil Fertility and Restoration of Depleted Sandy Soils on African Smallholder Farms. *Nutrient Cycling in Agroecosystems* 80 (3): 267–82. <https://doi.org/10.1007/s10705-007-9142-2>.
- Zougmore, R., A. Jalloh, and A. Tioro. 2014. Climate-smart soil water and nutrient management options in semiarid West Africa: A review of evidence and analysis of stone bunds and zaï techniques. *Agriculture and Food Security* 3 (1): 1–8. <https://doi.org/10.1186/2048-7010-3-16>.

Zougmore, R., A. Mando, and L. Stroosnijder. 2004. Effect of Soil and Water Conservation and Nutrient Management on the Soil-Plant Water Balance in Semi-Arid Burkina Faso. *Agricultural Water Management* 65 (2): 103–20.
<https://doi.org/10.1016/j.agwat.2003.07.001>.

Annexes

Annexe A

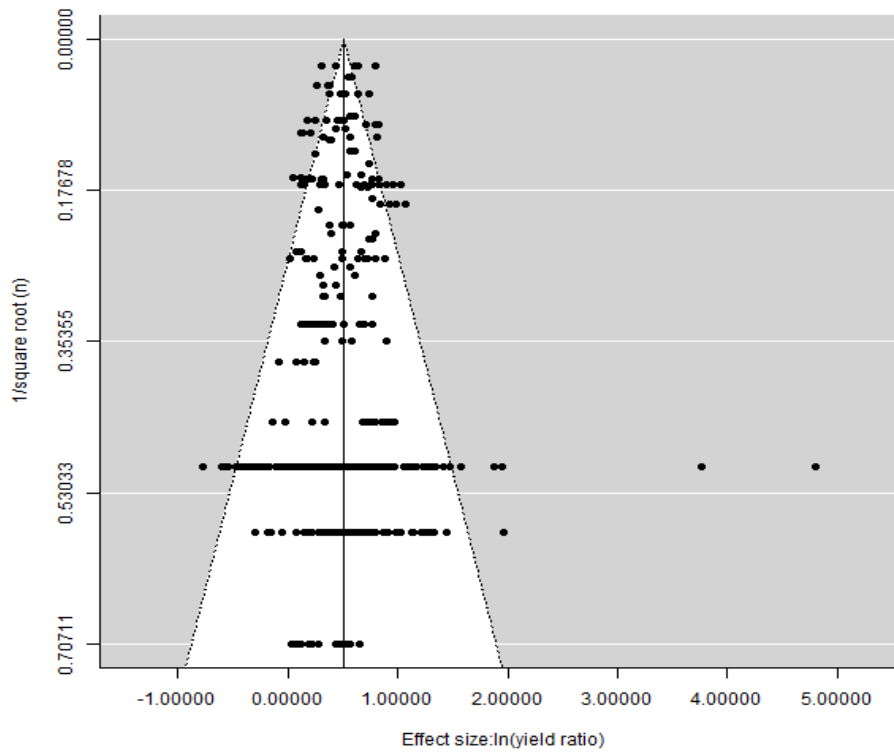


Figure A.1: Funnel plot of the natural logarithm of the effect size ($= \ln(\text{yield ratio})$) as a function of the inverse of the square root of the sample size (n).

Annexe B

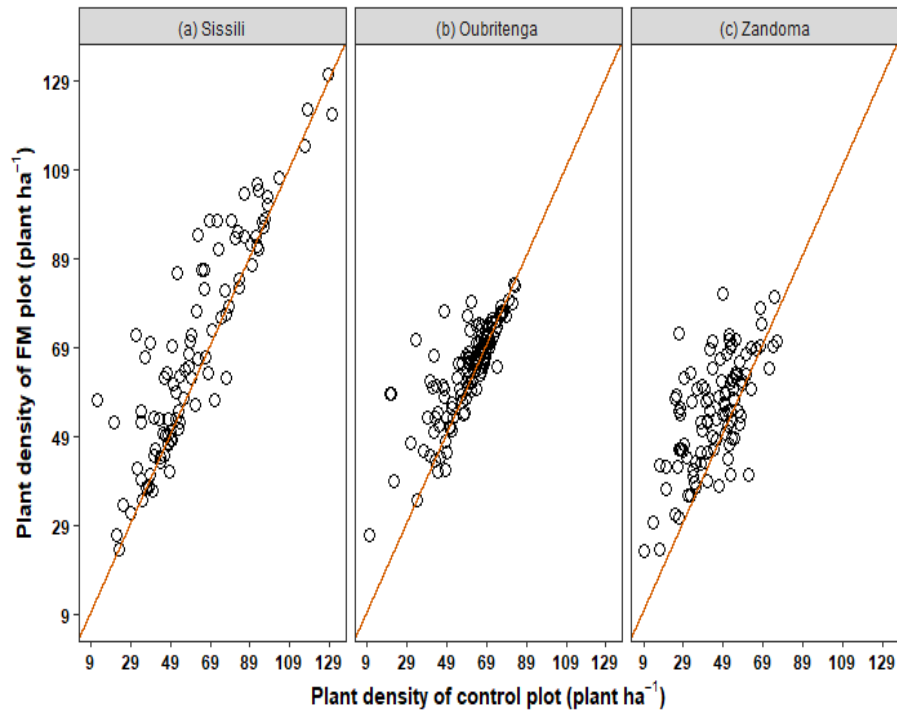


Figure B. 1: Plant density on FM plots as a function of plant density on control plots, determined at physiological maturity in the three studied provinces. The values on the axes are to be multiplied by 1000. The red line is the 1:1 line.

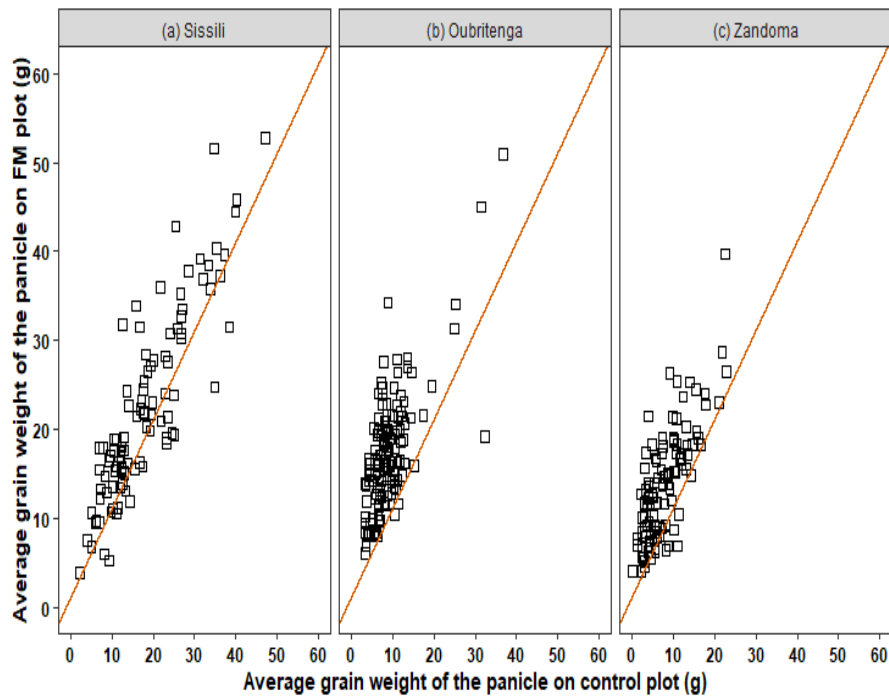


Figure B.2: Average grain weight of sorghum panicles on FM plots as a function of average grain weight of panicles on control plots in the three studied provinces. The red line is the 1:1 line.

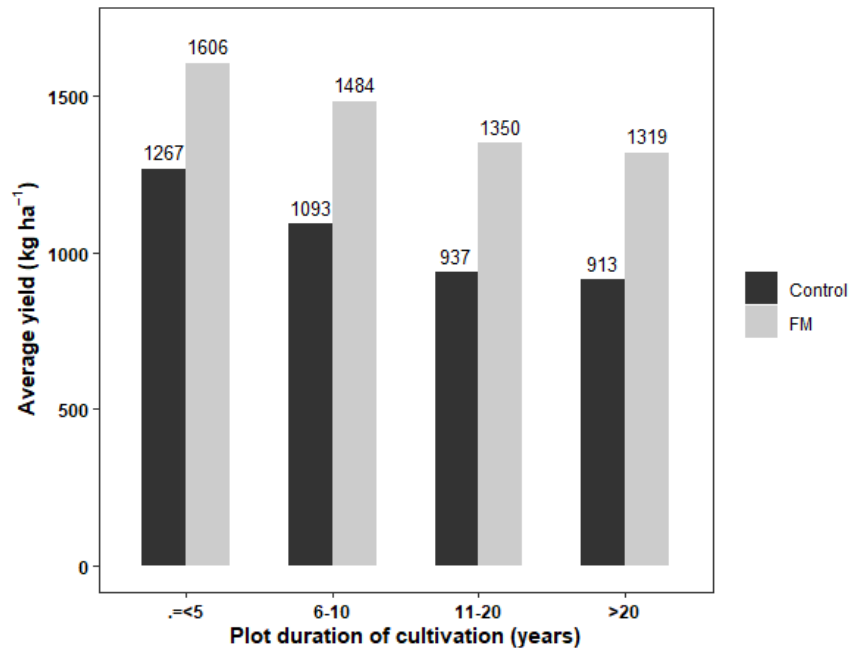


Figure B.3: Average sorghum grain yield for the Control and FM treatments as a function of plot duration of cultivation in the Sissili province.

Annexe C

PROTOCOLE POUR LA MACERATION DE BIOCHAR

Le présent protocole décrit la méthode de macération qui a été mise au point dans cette étude.

La méthode est décrite en prenant un exemple concret de la macération de 200 kg de biochar.

A. Ingrédients et matériels

Prévoir :

- 200 kg de biochar trié (voir point B)
- 200 kg d'engrais NPK
- environ 900 litres d'eau
- au maximum 13 fûts de 220 litres gradués.
- deux bassines
- un tamis
- un récipient gradué de 5 litres
- un récipient avec couvercle de 5 litres

B. Préparation

1. Broyer l'engrais NPK au moulin
2. Procéder à un tri manuel du biochar en retirant les particules non pyrolysées ou faiblement pyrolysées
3. Concasser le biochar s'il s'agit du biochar de rachis de maïs (mais éviter de produire de la poudre ou de très petites particules)

C. Détermination du taux de macération (Tm)

Remarque : le taux de macération doit être déterminé pour chaque type de biochar séparément.

1. Peser 5 kg de biochar trié (et concassé, si biochar de rachis de maïs)
2. Verser le biochar dans un fût gradué ; aplanir la surface du biochar, et lire le volume du biochar (**V_{bio5}**) à l'aide de la graduation volumique du fût.
3. Retirer le biochar du fût et le conserver dans un sac
4. Calculer le volume d'eau (V_{e5}) à ajouter comme suit : **V_{e5} = V_{bio5} x 0.4**

Remarque : 0.4 correspond au ratio (volume eau / volume biochar) pour lequel le volume d'eau est complètement absorbé par le volume correspond de biochar. La valeur a été déterminée au laboratoire pour le biochar de rachis de maïs, de tige de coton et gousse de *piliostigma* sp)

5. Verser un volume V_{e5} d'eau dans un fût vide
6. Ajouter progressivement, en remuant, 5 kg d'engrais NPK broyé, et fermer le fût pour éviter les pertes par volatilisation
7. Laisser l'engrais se dissoudre dans l'eau pendant 48h, en remuant régulièrement (toutes les deux heures), jusqu'à dissolution complète de l'engrais
8. Verser les 5 kg de biochar dans la solution d'engrais, et fermer le fût pour éviter les pertes par volatilisation
9. Laisser macérer pendant 48 h, en remuant régulièrement (toutes les deux heures). Ce remuage est très important pour assurer une absorption homogène de la solution par tout le biochar

10. Après 48h, essorer le biochar avec un tamis tout en recueillant l'éventuel reliquat de solution d'engrais dans une bassine.
11. Après avoir essoré tout le biochar, déterminer le volume du reliquat de la solution d'engrais recueilli (**Vreliquat**) à l'aide d'un récipient gradué de 5 litres.
12. Calculer le **Taux de macération (Tm)** comme suit :
$$Tm = (Ve5 - Vreliquat) / Vbio5$$
13. Jeter le biochar ainsi produit (il ne peut pas être utilisé pour les essais !)

Exemple de calcul du taux de macération:

Volume occupé par 5 kg de biochar (mesuré) : $V_{bio5} = 40$ litres

Volume d'eau à utiliser : $Ve5 = V_{bio5} \times 0.4 = 40 \times 0.4 = 16$ litres

Volume de solution restant après macération (mesuré) :
 $V_{reliquat} = 2$ litres

Taux de macération : $Tm = (Ve5 - V_{reliquat}) / V_{bio5} = (16 - 2) / 40 = 0.35$

D. Macération

Remarque : La macération se fait à raison de 15 kg / fût. Il faudra ainsi macérer 195 kg de biochar (= 13 x 15 kg).

1. Peser 15 kg de biochar trié (et concassé, s'il s'agit du biochar de rachis de maïs)
2. Verser le biochar dans un fût gradué ; aplanir la surface du biochar, et lire le volume (V_{bio15}) à l'aide de la graduation volumique du fût. Retirer le biochar du fût et le conserver dans un sac

3. Calculer le volume d'eau (Ve15) à ajouter comme suit : **$Ve15 = V_{bio15} \times T_m$** ; Tm étant le taux ayant été préalablement déterminé comme indiqué au point (C) ci-dessus.
4. Verser un volume d'eau correspondant à Ve15 dans un fût vide
5. Ajouter progressivement, en remuant, 15 kg d'engrais NPK broyé, et fermer le fût pour éviter les pertes par volatilisation
6. Laisser l'engrais se dissoudre dans l'eau pendant 48h, en remuant régulièrement (toutes les deux heures), jusqu'à dissolution complète de l'engrais
7. Verser les 15 kg de biochar dans la solution d'engrais tout en mélangeant intensément, et fermer le fût pour éviter les pertes par volatilisation
8. Laisser macérer pendant 48h pour permettre au biochar d'absorber toute la solution. Remuer régulièrement (toutes les deux heures). Ce remuage est très important pour assurer une absorption homogène de la solution par tout le biochar.
9. Après 48h, essorer le biochar à l'aide d'un tamis. Récupérer l'éventuel liquide restant et le conserver dans un récipient à couvercle fermé.

E. Séchage

1. Etaler le biochar macéré et essoré à l'ombre sur une bâche imperméable et le remuer régulièrement.
2. Au fur et à mesure que le biochar s'assèche, asperger le biochar avec l'éventuel liquide restant, tout en évitant les pertes de liquide par ruissellement.
3. Bien replier et recouvrir la bâche contenant le biochar en cas de pluie et en fin de journée pour éviter tout contact du biochar en séchage avec de l'eau de pluie.
4. Continuer le processus de séchage à l'ombre le nombre de jours nécessaire, jusqu'à ce que les particules de biochar ne soient plus humides.

5. Continuer le séchage au soleil lorsque les particules de biochar ne sont plus humides jusqu'à ce que le biochar soit bien sec.
6. Déterminer le poids sec total du biochar macéré
7. Conditionner le biochar macéré et séché dans des sacs doublés à l'intérieur de sachets plastiques.

Tableau C.1: Nombre de parcelles mises en place par province dans le cadre des essais visant à déterminer les facteurs de variabilité (Chap. 3) et à évaluer l’effet du compost ou biochar sur la réponse du sorgho à la FM (‘stratégies complémentaires’ ; chapitre 4).

Année	Essai ‘facteurs de variabilité’	Essai ‘stratégies complémentaires’	Total
2018	75	-	75
2019	75	30 ¹	75
2020	-	45	45

¹Les 30 parcelles ont été sélectionnées parmi les 75 parcelles de l’essai ‘facteurs de variabilité’, raison pour laquelle le total est de 75. Voir Figure C.1 pour le dispositif expérimental.

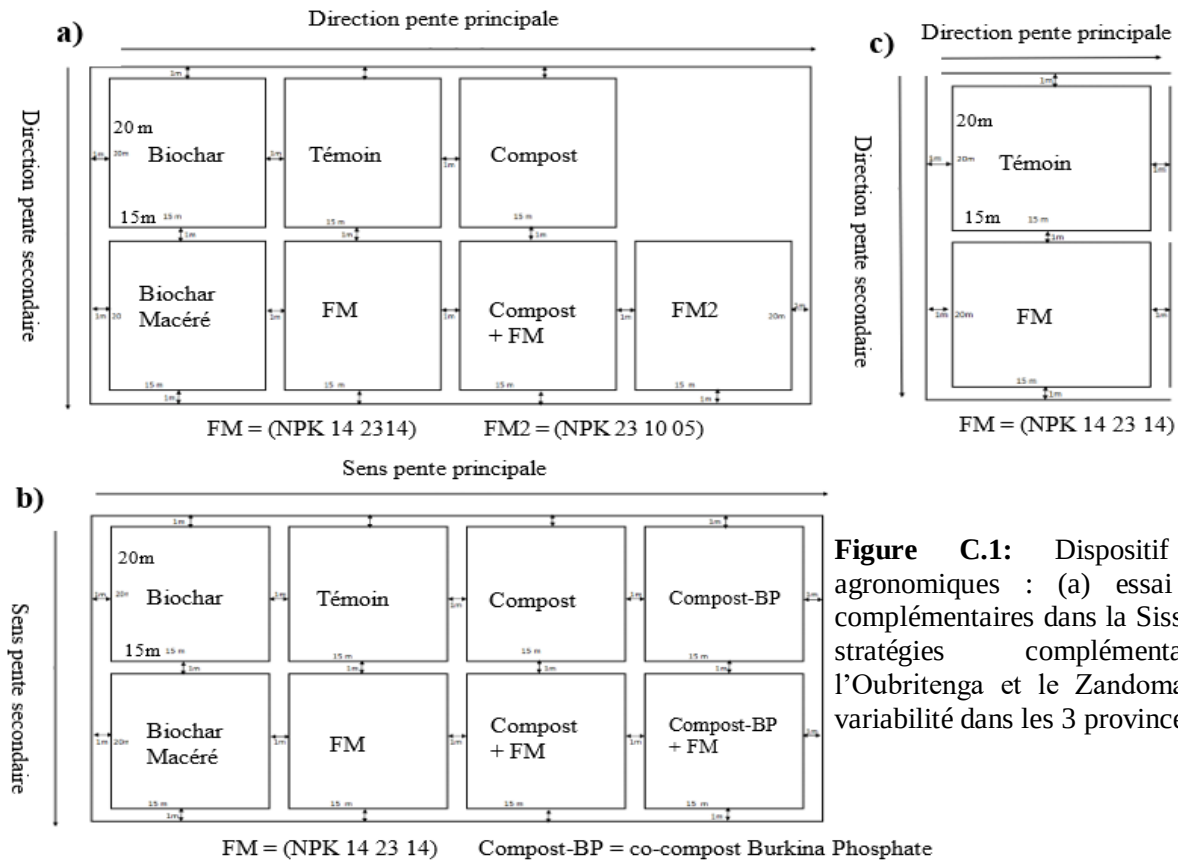


Figure C.1: Dispositif des essais agronomiques : (a) essai de stratégies complémentaires dans la Sissili, (b) essai de stratégies complémentaires dans l'Oubritenga et le Zandoma, (c) essai de variabilité dans les 3 provinces

Tableau C.2: Teneur en nutriments N, P et K (en %) des différents amendements organiques appliqués.

	Sissili			Oubritenga			Zandoma		
	N	P	K	N	P	K	N	P	K
Biochar									
Biochar only	0,93	0,28	1,78	0,61	0,14	1,48	1,72	0,43	2,96
Macerated Biochar in Fertilizer	6,03	4,81	6,29	5,44	3,17	4,77	5,88	4,25	7,00
Organic Amendments									
Compost (year 2019)	1,14	0,28	0,33	1,01	0,23	1,18	1,25	0,14	0,47
Compost-BP (year 2019)	n/a	n/a	n/a	0,81	1,40	1,52	1,43	1,73	1,48
Compost (year 2020)	1,46	0,33	2,23	1,65	0,73	0,85	1,67	0,29	2,47
Compost-BP (year 2020)	n/a	n/a	n/a	0,97	1,07	1,65	0,9	0,5	0,99

n/a = not applicable

Compost-BP = co-compost avec du Burkina phosphate.

Les composts (compost et compost-BP) ont été analysés au Centre Provincial de l'Agriculture et de la Ruralité (CPAR) du Brabant Wallon (Belgique) et le biochar à l'UCLouvain (Earth and Life Institute). Les teneurs en azote (N) ont été déterminées par la méthode DUMAS. Pour la détermination de la teneur en P et K, le biochar a été calciné à 550°C, minéralisé avec de l'HNO₃ et les teneurs (P et K) ont été déterminées par ICP-AES. Les composts (compost et compost-BP) ont été calcinés à 450°C et minéralisés avec de l'HNO₃. La teneur en K a été déterminée par spectrophotométrie d'absorption atomique dans la flamme air/acétylène et la teneur en P par spectrophotomètre UV.

Tableau C.3: Teneur en C, N, P assimilable et K assimilable des différents types de sol distingués pour chaque province

	Number of plots	C (%)	N (%)	P (ppm)	K (ppm)
Sissili					
Stony-gravelly soil	15	1,14 ± 0,39	0,08 ± 0,03	7,17 ± 2,53	92,19 ± 20,88
Gravelly soil	32	0,77 ± 0,30	0,05 ± 0,02	8,59 ± 3,49	67,13 ± 28,80
Sandy soil	40	0,46 ± 0,10	0,04 ± 0,01	6,10 ± 1,69	49,52 ± 16,58
Black soil	46	0,64 ± 0,18	0,05 ± 0,01	7,29 ± 4,45	61,36 ± 22,60
Oubritenga					
Gravelly soil	48	0,69 ± 0,20	0,05 ± 0,02	6,90 ± 3,12	83,93 ± 33,27
Sandy soil	43	0,50 ± 0,18	0,04 ± 0,02	4,22 ± 1,95	51,74 ± 19,84
Clay soil	34	0,79 ± 0,28	0,05 ± 0,02	4,07 ± 1,66	88,44 ± 39,97
Stream bank soil	49	0,64 ± 0,26	0,04 ± 0,02	2,81 ± 1,64	93,22 ± 36,62
Zandoma					
Gravelly soil	61	0,82 ± 0,71	0,07 ± 0,07	7,22 ± 2,61	66,31 ± 31,49
Sandy soil	29	0,58 ± 0,16	0,04 ± 0,01	5,46 ± 2,30	53,99 ± 31,20
Upper floodplain	21	0,55 ± 0,11	0,05 ± 0,01	5,69 ± 1,37	85,32 ± 33,77
Stream bank soil	35	0,65 ± 0,15	0,05 ± 0,01	4,91 ± 1,27	83,38 ± 37,93

Les échantillons de sols ont été analysés à l'UCLouvain (Earth and Life Institute).

Les analyses de C et N ont été effectuées par la méthode de Dumas. Le K a été extrait à l'acétate d'ammonium-EDTA et le P avec une solution Bray-1, et les mesures effectuées par ICP-AES.

Publications et conférences

Publications dans des journaux internationaux avec peer review : Publiés, soumis, et à soumettre

Ouedraogo, Y., Taonda, J.B.S., Sermé, I., Tychon, B., Biielders, C.L., 2020. Factors driving cereal response to fertilizer microdosing in sub-saharan Africa: A meta-analysis. *Agron. J.* 1–14.
<https://doi.org/10.1002/agj2.20229>

Djamen, P., Andrieu, N., Zerbo, I., **Ouédraogo, Y.**, Le Gal, P.-Y., 2015. Agriculture de conservation et performances des exploitations agricoles en Afrique de l'Ouest. *Cah. Agric.* 24, 113–122. <https://doi.org/10.1684/agr.2015.0743>

Ouedraogo, Y., Taonda, JB. S., Sermé, I., Tychon, B., Biielders, C. L. Drivers of sorghum response to fertilizer microdosing on smallholder farms across Burkina Faso. *Submitted to Field Crops Research*

Ouedraogo, Y., Taonda, JB. S., Sermé, I., Tychon, B., Biielders, C. L. Does combining fertilizer with organic amendments improve the effect of fertilizer microdosing on yields? The case of sorghum in smallholder farms in Burkina Faso. *To be submitted*

Communications Orales

Ouedraogo, Y., Taonda, JB. S., Sermé, I., Tychon, B., Biielders, C. L. Variability of sorghum response to fertilizer microdosing in Burkina Faso. EUROSOIL 2021 Virtual Congress. Geneva, from 23 to 27 August 2021

Posters

Ouedraogo, Y., Taonda, J.B.S., Sermé, I., Tychon, B., Biielders, C.L., 2020. Factors driving cereal response to fertilizer microdosing in sub-saharan Africa: A meta-analysis. 25th National Symposium for Applied Biological Sciences at Université de Liège, Gembloux Agro-Bio Tech, Espace Senghor, on 31st January.

Mémoires

- Ouedraogo, Y.**, 2015. Co-construction de systèmes d'Agriculture de Conservation adaptés au contexte agro-écologique de la zone cotonnière Ouest du Burkina Faso. Mémoire d'étude approfondie (DEA) en gestion intégrée des ressources naturelles, option système de production végétale, Université Polytechnique de Bobo-Dioulasso, Bobo-Dioulasso, Burkina Faso, 84 p.
- Ouedraogo Y.**, 2012. Analyse « ex-ante » des effets de l'agriculture de conservation sur le fonctionnement et les performances technico-économiques des exploitations agricoles à l'aide de la modélisation : cas de Koumbia. Mémoire d'ingénieur agronome du développement rural, Université Polytechnique de Bobo-Dioulasso, Bobo-Dioulasso, Burkina Faso, 53 p.

Biographie



Yacouba Ouedraogo est né le 31 décembre 1986 à Dawèra, Burkina Faso. Il obtient son Baccalauréat série « D » en 2006. Il entame ses études supérieures en 2007 à l'Université Polytechnique de Bobo-Dioulasso où il obtient son diplôme d'ingénieur du développement rural, option agronomie, en 2012. Il débute en 2013 dans cette même université une formation d'étude approfondie (DEA) en gestion intégrée des ressources naturelles, option système de production végétale, spécialité sciences du sol, qu'il réalise concomitamment avec un stage au Centre International de Recherche Développement sur l'Elevage en zone au Subhumide (CIRDES). Au cours de sa formation de DEA, il obtient une bourse pour effectuer un programme académique et de stage pratique en entreprise agricole de 11 mois en Israël. De retour de stage en 2014, il obtient son diplôme de DEA en 2015. Il réussit la même année le concours de recrutement du ministère en charge de l'eau et de l'agriculture et est affecté à la Direction Générale de l'Agence de l'Eau du Nakanbé (DG-AEN). Il y occupe le poste de chef de service du développement durable de 2015 à 2017, où il est en charge de l'élaboration du Schéma Directeur d'Aménagement et de Gestion des Eaux (SDAGE) du bassin hydrographique de l'espace de compétence de l'Agence de l'Eau du Nakanbé. En août 2017, il obtient une bourse de 4 ans pour effectuer un doctorat en sciences agronomiques et ingénierie biologique à l'Université catholique de Louvain (UCLouvain, Belgique), en collaboration avec l'Institut de

l'Environnement et de Recherches Agricoles (INERA) du Burkina Faso. Au cours de cette thèse, il a travaillé à identifier les facteurs biophysiques et agronomiques déterminant la variabilité de la réponse en rendement des cultures céréalières à la fertilisation microdose au Burkina Faso.