

Connaissance locale de la variabilité de surface du sol et des contraintes associées pour la production du niébé en zone sahélienne du Niger

B. Seyni Bodo ^(1,2,3*), X. Morvan ⁽³⁾, O. Malam Issa ⁽²⁾, D. Tidjani Adamou ⁽¹⁾, J.-M. Ambouta Karimou ⁽¹⁾, B. Marin ⁽³⁾, M. Ponthieu ⁽³⁾ et G. Fronteau

- 1) Département Sciences du sol, Faculté d'Agronomie, Université Abdou Moumouni de Niamey, Niger, BP: 10960 Niamey, Niger
- 2) Institut de Recherche pour le Développement, IRD, Niger, BP 11416 Niamey, Niger
- 3) GEGENAA EA.3795, Université de Reims Champagne-Ardenne, Centre de Recherche en Environnement et Agronomie, 2 esplanade Roland Garros, 51100 Reims, France

*: Auteur correspondant: bachiroubodo@yahoo.fr

RÉSUMÉ

La prise en compte des connaissances locales de la variabilité de surface du sol constitue un levier pour optimiser la production végétale et élaborer des stratégies de gestion durable des agrosystèmes sahéliens. L'objectif de cette étude est d'évaluer les connaissances locales sur la variabilité de surface du sol et la gestion des contraintes pédologiques pour la production du niébé au Niger. Pour y parvenir, des enquêtes semi-directives ont été conduites au sud de la région de Tillabéri et à l'extrême nord de la région de Maradi. Ces deux régions offrent des conditions agro-écologiques, pédoclimatiques (climat, sols, pratiques culturelles) et socio-économiques (utilisation et commercialisation) différentes vis-à-vis de la culture du niébé. Au total, 600 producteurs de niébé ont été soumis à un questionnaire semi-structuré visant (1) à déterminer leurs connaissances de la variabilité de surface du sol et (2) à hiérarchiser les entités homogènes de la surface de leurs champs selon leurs potentiels productifs et leurs niveaux de fertilité. Les résultats obtenus ont révélé que 96 % des producteurs enquêtés sur l'ensemble des sites sont conscients de la variabilité de surface du sol. Ils reconnaissent que la variabilité de la surface du sol est liée à la nature du sol, le travail du sol, l'érosion, la topographie ou le type de végétation. L'érosion des sols apparaît comme une cause de la variabilité de surface pour 57 à 61 % des producteurs de la région de Tillabéri, tandis que dans la région de Maradi, les producteurs identifient la nature du sol (61 %), la topographie (39 %) et le couvert végétal (36 %) comme principales causes de la variabilité de surface du sol. Les entités de surface à croûtes structurales sous houppier de *Faidherbia albida* sont considérées comme les plus

Comment citer cet article:

Seyni Bodo B., Morvan X., Malam Issa O., Tidjani Adamou D., Ambouta Karimou J.-M., Marin B., Ponthieu M. et Fronteau G. - 2019 - Connaissance locale de la variabilité de surface du sol et des contraintes associées pour la production du niébé en zone sahélienne du Niger, *Etude et Gestion des Sols*, 26, 65-79

Comment télécharger cet article:

<http://www.afes.fr/publications/revue-etude-et-gestion-des-sols/volume-26/>

Comment consulter/télécharger

tous les articles de la revue EGS: www.afes/egs/

productives pour 41 à 67 % des paysans interrogés. Les entités de surface à croûtes structurales et à croûtes d'érosion sont considérées comme étant les moins productives.

Les résultats présentés dans cette étude permettront de faciliter le dialogue entre les producteurs, les conseillers agronomiques et les chercheurs en vue de proposer des solutions pour améliorer la production du niébé dans des parcelles avec une grande hétérogénéité de surface en zone sahélienne.

Mots clés

Variabilité de surface du sol, niébé, fertilité des sols, enquêtes semi-directives, production du niébé, Niger.

SUMMARY

FARMER LOCAL KNOWLEDGE OF SOIL SURFACE VARIABILITY AND RELATED CONSTRAINTS FOR COWPEA PRODUCTION IN THE SAHELIAN ZONE OF NIGER

*Taking into account local knowledge of soil surface variability is a lever to optimize vegetable production and develop sustainable management strategies for Sahelian agrosystems. This study dealt with local knowledge of soil surface variability and assessment of their suitability for cowpea production in the Sahelian zone of Niger. It aimed to evaluate farmers' knowledge for the management of soil constraints for cowpea production. For this purpose, semi directive surveys were conducted in two contrasting regions (Tillabéri in the south and Maradi in the far north) in terms of soil, climatic conditions, cultural practices and socio economic conditions (use, marketing) related to cowpea production. A total of 600 cowpea producers were interviewed with a semi structured questionnaire aimed at (1) determining their knowledge of soil surface variability and (2) prioritizing the homogeneous surface entities of their field according to the productive potentials and their fertility levels. The results showed that 96 % of the farmers surveyed were aware of soil surface variability in all sites. They recognized soil types, tillage, erosion, topography and vegetation type as main factors of soil surface variability. Soil erosion appeared to be a cause of soil surface variability for 57 to 61 % of producers in the Tillabéri region, while in the Maradi region, producers identified the nature of the soil (61 %), topography (39 %) and vegetation cover (36 %) as the main causes of soil surface variability. The results showed a variability of the homogeneous soil surface features within the farm fields, which were evaluated by the producers on the basis of their agronomic potential and their level of fertility: structural crust under *Faidherbia albida* is cited 41-67 % of the farmers surveyed as the most productive cowpea soil surface; surfaces features with erosion crust and those with of normal surface features with structural crust are considered to be the least productive. These results will contribute to facilitate dialogues between producers, agricultural advisers and researchers in finding solutions to improve cowpea production in plots with great heterogeneity in the Sahelian zone.*

Key-words

Soil surface variability, cowpea, soil fertility, semi directive surveys, cowpea production, Niger.

RESUMEN

CONOCIMIENTO LOCAL DE LA VARIABILIDAD DE LA SUPERFICIE DEL SUELO Y DE LOS LIMITANTES ASOCIADOS PARA LA PRODUCCIÓN DE CAUPI EN ZONA SAHELIANA DEL NÍGER

La toma en cuenta de los conocimientos locales de la variabilidad de la superficie del suelo constituye una palanca para optimizar la producción vegetal y elaborar estrategias de gestión sostenible de los agro-sistemas sahelianos. El objetivo de este estudio es evaluar los conocimientos locales sobre la variabilidad de la superficie del suelo y la gestión de los limitantes pedológicos para la producción de caupi en Niger. Para lograrlo, se realizó encuestas semiestructuradas al sur de la región de Tillabéri y al extremo norte de la región de Maradi. Estas dos regiones ofrecen condiciones agro-ecológicas, pedoclimáticas (clima, suelo, prácticas de cultivo) y socio-económicas (uso y comercialización) diferentes en cuanto al cultivo del caupi. Al total, 600 productores de caupi fueron sometidos a un cuestionario semiestructurado que consiste (1) en determinar sus conocimientos de la variabilidad de la superficie de suelos y (2) en jerarquizar las entidades homogéneas de la superficie de sus parcelas según sus potenciales productivos y sus niveles de fertilidad. Los resultados obtenidos revelaron que 96 % de los productores encuestados en todos los lugares son conscientes de la variabilidad de la superficie del suelo. Reconocen que la variabilidad de la superficie del suelo está ligada a la naturaleza del suelo, al trabajo del suelo, a la erosión, a la topografía o al tipo de vegetación. La erosión del suelo aparece como una causa de la variabilidad de la superficie para 57 a 61 % de los productores de la región de Tillabéri, aunque en la región de Maradi, los productores identifican la naturaleza del suelo (61 %), la topografía (39 %) y la cubierta vegetal (36 %) como causas principales de la variabilidad de superficie del suelo. Se consideran las

entidades de superficie con costras estructurales bajo copa de *Faidherbia albida* cómo las más productivas para 41 a 67 % de los agricultores interrogados. Se consideran las entidades de superficie con costras estructurales y con costras de erosión como las menos productivas. Los resultados presentados en este estudio permitirán facilitar el diálogo entre los productores, los asesores agrónomos, y los investigadores en vista a proponer soluciones para mejorar la producción de caupi en parcelas con grande heterogeneidad de superficie en zona saheliana.

Palabras clave

Variabilidad de la superficie del suelo, caupi, fertilidad del suelo, encuestas semiestructuradas, productores, Niger .

Les sols de la zone sahéenne sont connus pour leur grande hétérogénéité de surface (Thiombiano, 2000). Celle-ci se définit comme la variabilité intra ou inter-parcellaire avec des entités de surface homogènes disparates, chacune ayant des caractéristiques intrinsèques spécifiques (Thiombiano, 2000; Gandah *et al.*, 2000; Brouwer, 2008). La variabilité de surface influe sur le fonctionnement, l'état de fertilité, la qualité physique et chimique du sol (Brouwer, 2008) et, par conséquent, entraîne une forte variabilité spatiale de la production des cultures (Milleville et Serpantié, 1992; Brouwer *et al.*, 1993; Batchelor *et al.*, 2002; Voortman *et al.*, 2004; Turner et Hiernaux, 2015). Sa prise en compte dans les techniques culturales est synonyme d'agriculture de précision, présentée comme une alternative d'amélioration de la productivité des cultures et de la rentabilité des exploitations modernes (Tourino-Soto, 2005; Jullien et Huet, 2005; Mulla, 2013). Les paysans sahéens développent des savoirs locaux ou des stratégies ponctuelles de gestion des agrosystèmes et de lutte pour faire face à la fois aux conséquences de la variabilité de surface du sol et à la fois à celles de la dégradation de terres (Yaméogo *et al.*, 2005). Certaines pratiques comme l'association des cultures sont adaptées selon la variabilité de surface du sol (Vasseur *et al.* 2013). Ces savoirs locaux constituent un levier de développement dont la prise en compte est nécessaire pour l'élaboration de stratégies de gestion conservatoire des eaux et des sols dans les agrosystèmes sahéens (Roose, 1989; Bouzou et Yamba, 2008).

La variabilité de surface en zone sahéenne est traduite par les modifications des états de surface, notamment la formation des croûtes de surface, les changements dans la microtopographie et le couvert végétal. Ces modifications sont liées à des facteurs climatiques et biologiques auxquels s'ajoutent celles induites par l'homme à travers les pratiques culturales ou les activités de récupération/réhabilitation des terres (Milleville et Serpantié, 1992; Thiombiano, 2000; Abril *et al.*, 2009; Voortman *et al.*, 2004; Mzuku *et al.*, 2005; Cruz *et al.*, 2008; Vasseur *et al.*, 2013; Tittonell *et al.*, 2013; Turner et Hiernaux, 2015). Les pratiques culturales telles que l'agroforesterie permettent une amélioration de la fertilité des sols et de la production des cultures et contribuent à la variabilité de surface du sol (Boffa, 2000; Wezel *et al.*, 2000; Abdou *et al.*,

2013; Dan Lamso *et al.*, 2015c). Tandis que d'autres pratiques culturales comme le sarclage, le dessouchage, le défrichage, le ramassage des résidus des cultures favorisent l'érosion, engendrent la destruction ou la déstabilisation du sol (Roose, 1989; Madjigoto et Gounel, 2003). Elles conduisent à l'apparition des surfaces dénudées, la diminution du stock de carbone, la mobilisation des particules, l'apparition des encroûtements physiques et le transfert préférentiel des éléments fins qui sont des supports de la fertilité des sols (Ambouta *et al.*, 1996; Ambouta *et al.*, 1998; Warren *et al.*, 2001; Hien *et al.*, 2003; Valentin *et al.*, 2004; Bielders *et al.*, 2004; Abdourhamane Touré, 2011).

La variabilité de surface induite par la modification du couvert végétal est un phénomène très marqué au Niger, pays sahéen dont l'agriculture constitue la principale activité économique des populations. Elle est en partie due à une agriculture de type traditionnel qui exacerbe la fragilité des agroécosystèmes à travers une pression sur les ressources foncières, notamment la réduction de la durée de jachère et la mise en culture des terres marginales (Guengant et Banoïn, 2003; Zeinabou *et al.*, 2014). Soumis aux effets conjugués de l'insuffisance et de l'irrégularité des précipitations, ainsi qu'à une forte croissance démographique, les sols peu fertiles de ces agroécosystèmes sont exposés à différents processus de dégradation (érosion et encroûtement de surface) et une baisse généralisée de leurs niveaux de fertilité (Ambouta *et al.*, 1998). C'est dans ce contexte qu'est cultivé le niébé qui, en plus d'être l'une des sources de protéines les moins onéreuses pour l'alimentation des populations et des bétails (Moumouni *et al.*, 2013), revêt un intérêt écologique à travers la fixation symbiotique de l'azote atmosphérique (Diop *et al.*, 2013). La rotation culturale, associant la culture de niébé, et l'assolement constituent des pratiques de restauration et de stratégies efficaces de gestion de la fertilité des sols qui conduisent à l'accroissement de la production d'autres cultures comme le mil, le maïs, le sorgho... (Bado, 2000; Bagayoko *et al.*, 2000; Djenontin *et al.*, 2003; Bado *et al.*, 2006; Coulibaly *et al.*, (2017). L'optimisation de la production du niébé au Niger nécessite une meilleure connaissance de la variabilité de surface du sol et des contraintes pédologiques qui y sont liées (Dabat et Richard, 2012).

Cette étude vise à accompagner le développement des stratégies intégrées pour une minimisation de l'effet de la variabilité de la surface du sol sur la productivité du niébé. Son objectif est d'évaluer les connaissances locales sur la variabilité de surface du sol et la gestion des contraintes pédologiques à la production du niébé au Niger. L'approche méthodologique se base sur des enquêtes semi-directives visant à collecter des informations relatives (i) à la connaissance locale de la variabilité de surface du sol par les producteurs, (ii) aux critères utilisés par les producteurs pour hiérarchiser les entités homogènes et (iii) aux stratégies développées pour une meilleure gestion de la variabilité de surface du sol et l'amélioration de la productivité du niébé.

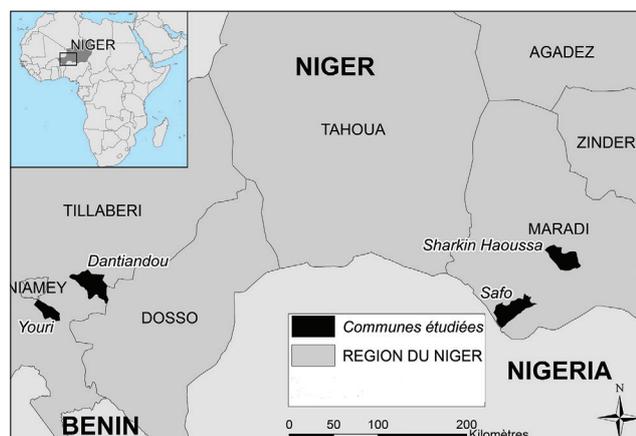
MATÉRIEL ET MÉTHODES

Sites d'étude

L'étude a été conduite dans les communes de Dantiandou et Youri dans la région de Tillabéri, Sharkin Haoussa et Safo dans la région de Maradi (*figure 1*). Ces deux régions offrent des conditions agro-écologiques, pédoclimatiques (climat, sols, pratiques culturales) et socio-économiques (utilisation et commercialisation) différentes vis-à-vis de la culture du niébé. Les deux régions sont soumises à un climat de type sahélien, caractérisé par l'alternance d'une longue saison sèche s'étalant sur 8 à 9 mois (d'octobre à mai et parfois jusqu'en avril) et d'une saison humide plus courte de 3 à 4 mois (de juin à septembre ; CNEDD, 2004). Les cumuls pluviométriques annuels enregistrés en 2015 dans les quatre communes étudiées varient entre 470 mm à Dantiandou et 540 mm à Youri (région de Tillabéri) et entre 450 mm à Sharkin Haoussa et 500 mm à Safo (région de Maradi). Les sols des communes de Dantiandou, Youri et Sharkin Haoussa sont des sols ferrugineux tropicaux classés

Figure 1 : Localisation des zones d'étude.

Figure 1 : Location of study areas.



dans les Arénosols Ferralliques (IUSS Working Group WRB, 2015). Les sols de la commune de Safo regroupent des Arénosols Ferralliques et des Gleysols (IUSS Working Group WRB, 2015) ou sols alluviaux du Goulbi de Maradi. La densité de population dans les communes de la région de Maradi est trois fois supérieure à celle des communes de la région de Tillabéri (26,5 vs 9,3 habitants/km²; CNEDD, 2004). Cette différence se traduit à travers le nombre d'habitants recensés dans les quatre communes (38073 et 44653 habitants recensés à Dantiandou et Youri, respectivement, contre 93318 et 93491 habitants recensés à Sharkin Haoussa et Safo, respectivement; INS, 2016).

En terme de production de niébé, 107 900 tonnes de niébé ont été récoltées sur 870 000 hectares cultivés dans la région de Maradi contre 65 470 tonnes récoltées sur 473 000 hectares dans la région de Tillabéri (INS, 2010). La différence de rendements observée entre les deux régions s'explique par des pratiques agricoles différentes. Le travail du sol dans la région de Tillabéri consiste en un sarclage superficiel réalisé à l'aide d'un outil aratoire appelé iler. Dans la région de Maradi, les outils utilisés, à savoir la daba ou la charrue à traction animale, permettent un sarclage plus profond. De plus, dans la région de Maradi, l'association des cultures sur une même parcelle se fait de manière continue avec plusieurs espèces végétales (mil, niébé, sorgho, arachide, oseille), alors qu'en général, dans la région de Tillabéri, cette association concerne en majorité le mil et le niébé (Malam Abdou *et al.*, 2016). La commercialisation du niébé (fanés et graines) est plus importante dans la région de Maradi que dans la région de Tillabéri (INS, 2010).

Collecte des données

L'enquête réalisée dans les communes de Dantiandou et Youri dans la région de Tillabéri, Sharkin Haoussa et Safo dans la région de Maradi a concerné cinq villages représentatifs par commune. Dans chacun des 20 villages concernés, 30 producteurs ont été interrogés suivant un questionnaire semi-structuré, ce qui représente un total de 600 entretiens pour l'ensemble des sites d'étude. Les producteurs de plus de 25 ans ont été privilégiés en tenant compte de l'âge d'accès à la propriété foncière et l'expérience présumée des enquêtés.

La collecte des informations dans le cadre de cette étude s'est déroulée en deux étapes : (1) l'identification des entités homogènes de surface du sol et (2) la conduite et l'administration de questionnaires d'enquêtes auprès des producteurs.

La première étape a consisté en l'identification des entités homogènes de surface du sol, réalisée grâce à des prospections et des observations de terrain complétées par des entretiens semi-directs réalisés avec les producteurs. A la suite de cette identification, une typologie des entités homogènes de surface a été établie sur la base des caractéristiques des états de surface en zone sahélienne définies par Casenave et Valentin

(1989). Les sept types d'entités de surface du sol identifiées sur l'ensemble des sites sont :

- les entités de surface à croûtes d'érosion (ERO). Elles sont caractérisées par des particules fines formant une pellicule plasmique. Ce sont des surfaces lisses et imperméables à l'eau résultant de l'érosion des horizons meubles de surface. Ces entités de surface à croûte d'érosion ne sont présentes que sur les sites de la région de Tillabéri ;
- les entités de surface à croûtes de décantation (DEC). Elles sont caractérisées par une couche de particules fines surmontant une couche de particules grossières. Ce sont des surfaces lisses, souvent striées par la formation de fentes de retrait lors des périodes de dessiccation. Elles se forment dans les dépressions où convergent les pentes des zones voisines et concentrent des eaux de ruissellement et des matières en suspension. Les entités de surface à croûtes de décantation sont absentes sur le site de Safo dans la région de Maradi. Cette absence est liée à la faible topographie et au travail de sol favorable au drainage des eaux.
- les entités de surface à croûtes de dépôts éoliens (EOL-GS). Elles sont associées aux buttes sableuses autour des touffes de *Guiera senegalensis*. Elles sont formées par l'accumulation des sédiments éoliens et des débris organiques. Elles se caractérisent par une rupture de pente liée à un bombement de terrain par rapport aux autres surfaces du champ. L'état de surface caractéristique de ces entités est la croûte de dépôts éoliens (EOL). Les entités de surface à croûtes de dépôts éoliens autour des touffes de *Guiera senegalensis* sont absentes sur le site de Safo dans la région de Maradi. Cette absence est surtout liée à la disparition des arbustes de *Guiera senegalensis* largement utilisé pour des besoins domestiques, en particulier les bois de chauffe ;
- les entités de surface à croûtes structurales associées au houppier de *Faidherbia albida* (ST-FA). Ce sont des surfaces à forte rugosité qui se distinguent par une accumulation des résidus organiques liés à la chute des feuilles et des fruits de *Faidherbia albida* et aux déjections des animaux. L'état de surface caractéristique de ces entités correspond à des croûtes structurales résultant de la réorganisation des particules de la surface des sols sous l'impact des gouttes de pluie ;
- les entités de surface à croûtes structurales associées aux fourmillières (ST-F). Elles sont liées à des débris organiques récoltés par les fourmis. Elles présentent des microreliefs dus à la remontée des sols en surface par les fourmis qui creusent leurs galeries en arrachant le sol et en le rejetant en surface, ce qui façonne des monticules en forme d'entonnoir. La partie sommitale de ce monticule constitue la couronne de la fourmière, recouverte par une surface à croûte d'érosion qui n'est jamais mise en culture. Les entités de surface à croûtes structurales associées aux fourmillières ne se rencontrent que dans la région de Maradi ;

- les entités de surfaces à croûtes de décantation sur alluvion (DEC-AL). Ce sont les surfaces caractéristiques des champs cultivés sur les sols alluviaux de la commune de Safo dans la région de Maradi. Elles sont constituées par des particules fines et des débris organiques déposés sur les terrasses alluviales du Goulbi de Maradi. Malgré de bonnes aptitudes agronomiques, ces surfaces sont contraignantes pour le travail du sol en lien avec leur caractère hydromorphe et leur richesse en particules fines ;

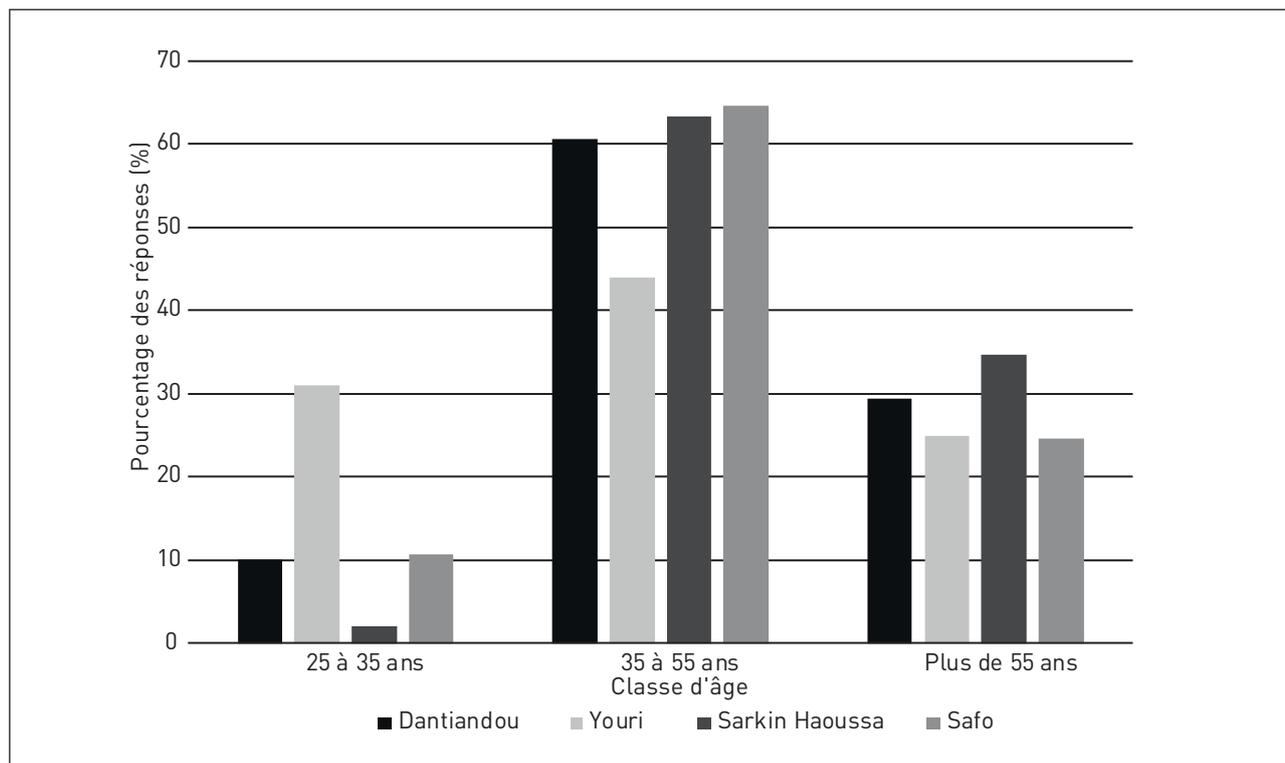
- les entités de surfaces normales ou surfaces de référence à croûtes structurales (ST-SN). Ce sont les surfaces caractéristiques des champs cultivés sur Arénosols Ferralliques. Elles constituent les entités de surface les plus répandues dans les deux régions de Maradi et Tillabéri. Ces surfaces présentent une topographie relativement plane et sont recouvertes d'un voile de sable relativement homogène sans agrégat. La croûte structurale (ST) est le principal état de surface qui caractérise cette entité.

La deuxième étape a consisté à interroger les producteurs en utilisant un questionnaire semi-structuré administré individuellement sous la forme d'entrevues semi-directes qui est une technique interactive entre interviewé et interviewer. Elle donne une liberté à la personne enquêtée d'exprimer son opinion comme un discours et à celle qui enquête la liberté de centrer et de recadrer les échanges. Les entretiens semi-directs réalisés durant la première étape ont servi à tester et affiner ce questionnaire auprès des producteurs.

Le premier objectif visé était de collecter des informations relatives aux enquêtés (âge, niveau d'instruction), à leurs connaissances de la variabilité de surface du sol, leurs connaissances des facteurs déterminant la variabilité et leurs stratégies de gestion des contraintes édaphiques liées à la production du niébé. Il s'agissait ensuite d'établir une hiérarchisation des entités homogènes de surface du sol identifiées selon leur potentiel productif et leur niveau de fertilité.

Traitement des données

Des analyses statistiques descriptives ont été réalisées avec le logiciel SPSS 24. Elles ont permis d'extraire des données caractéristiques de la population enquêtée et descriptives de leurs connaissances vis-à-vis des facteurs déterminant la variabilité, des contraintes édaphiques et les stratégies de leur gestion liées à la production du niébé et la hiérarchisation des entités homogènes. Des analyses en composantes principales ont ensuite été conduites sous Xlstat version 2017 pour déterminer la distribution de ces variables en fonction des sites d'étude. Les contributions absolues et relatives (cosinus²) ont été utilisées pour mesurer la qualité de représentation des variables de connaissances locales et des sites par rapport aux axes. Les observations les mieux représentées sur les axes sont en gras dans les tableaux.

Figure 2 : Proportion des classes d'âge des paysans enquêtés.**Figure 2 :** Proportion of age classes of farmers surveyed.

RÉSULTATS

Caractéristiques des producteurs enquêtés

La figure 2 présente la répartition des producteurs de niébé enquêtés par site et selon trois classes d'âges. Les producteurs d'âge compris entre 35 et 55 ans représentent 44 à 69 % de la population enquêtée. Cette classe d'âge est majoritaire sur l'ensemble des sites, notamment sur trois sites à savoir Safo, Sharkin Haoussa et Dantiandou où elle regroupe plus de 60 % des enquêtés. Elle est suivie par la classe des producteurs d'âge supérieur à 55 ans. La classe d'âge minoritaire est constituée par les producteurs dont l'âge est compris entre 25 et 35 ans.

La proportion des producteurs scolarisés représente 22 % de la population enquêtée. Cette proportion varie de 9 % à Dantiandou à 43 % à Safo. Elle est de 39 % et 13 % sur les sites de Youri et Sharkin Haoussa, respectivement.

Connaissance locale de la variabilité de surface du sol par les producteurs

Les producteurs qui ont conscience de la variabilité de surface du sol représentent 96 % des personnes interrogées

sur l'ensemble des sites. Le pourcentage le plus faible (89 %) a été observé à Youri et le plus élevé (99 %) à Dantiandou. Les proportions observées à Sharkin Haoussa et Safo sont respectivement de 97 et 98 %. D'après les producteurs, la variabilité de surface des sols se traduit par des changements dans la diversité des espèces végétales, le développement des cultures et les rendements associés à l'échelle d'une même parcelle cultivée. Ils désignent les entités de surface du sol les plus productives au sein d'une parcelle par « *nongou gabou* » dans la région de Tillabéri (Dantiandou et Youri) et « *wurin may bada* » dans la région de Maradi (Sharkin Haoussa et Safo). Des expressions comme « *nongou bou ko* » sont utilisées à Dantiandou et Youri pour désigner les surfaces moins ou pas du tout productives. Les mêmes surfaces sont désignées par « *matattu wurin* » à Sharkin Haoussa et Safo. La conscience de la variabilité de surface du sol par les producteurs se traduit également dans sa prise en compte dans les pratiques culturales (modes de semis, travail du sol et gestion de la fertilité). Les semis sont effectués sur les entités productives avec de fortes densités, c'est-à-dire avec un écartement réduit (en général inférieur à celui habituellement appliqué dans les autres parties des champs) entre les rangs et entre les poquets de niébé. Ces entités bénéficient également d'un effort plus important en termes de travail du sol. Les surfaces peu

Tableau 1 : Facteurs responsables de la variabilité de surface du sol.

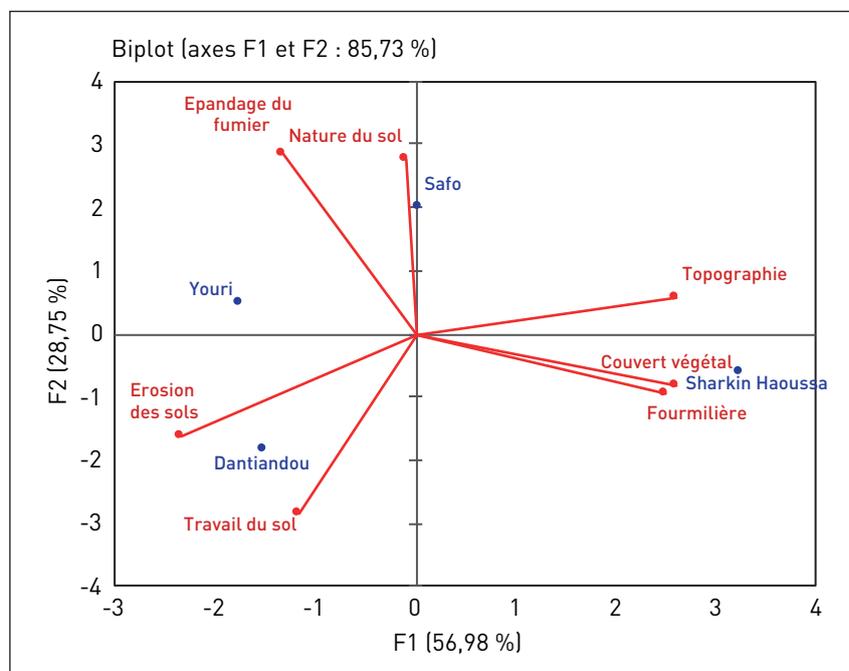
Table 1 : Factors responsible for soil surface variability.

Facteur causal	Fréquence par site (%)			
	Dantiandou	Youri	Sarkin Haoussa	Safo
Nature du sol	5	0	1	33
Topographie	13	11	39	27
Erosion	62	57	0	9
Couvert végétal	20	18	36	21
Travail du sol	1	0	0	0
Epandage du fumier	0	14	0	10
Fourmilière	0	0	24	0

productives font l'objet d'un semis de faible densité. Elles sont souvent privilégiées pour les amendements organiques mais peuvent aussi être abandonnées car réputées difficiles pour le travail du sol. C'est le cas des entités de surface à croûtes d'érosion, rencontrées sur les sites de la région de Tillabéri dont l'abandon s'explique en partie par le manque de moyens et d'outils appropriés pour le labour profond.

Figure 3 : Analyse en composantes principales des connaissances locales des facteurs responsables de la variabilité de surface du sol sur les sites.

Figure 3 : Principal component analysis of local knowledge of factors responsible for soil surface variability at sites.



Connaissance locale des facteurs responsables de la variabilité de surface du sol

Les principaux facteurs responsables de la variabilité de surface du sol identifiés par les producteurs regroupent l'érosion des sols, la topographie, le couvert végétal, la nature du sol et la présence de fourmilières. Sur l'ensemble des sites, 32 % de la population enquêtée ont déterminé l'érosion des sols comme étant le facteur dominant dans l'apparition de la variabilité de surface du sol. Le travail du sol, l'apport de fumure organique et la présence de fourmilières sont reconnus comme les facteurs de faible influence.

Les réponses spécifiques recueillies sur les différents sites sont regroupées dans le *tableau 1*. Les données recueillies sur les sites de Dantiandou et Youri (région de Tillabéri) confirment la tendance générale observée à l'échelle de l'ensemble des sites; 57-62 % des enquêtés attribuent à l'érosion des sols la plus grande influence sur la variabilité de surface du sol. Cette tendance diffère de celle observée à Safo où 33 % des personnes enquêtées identifient la nature du sol comme le facteur majeur. A Sharkin Haoussa, la topographie, le couvert végétal et dans une moindre mesure les fourmilières sont les facteurs prédominants identifiés, respectivement par 39, 36 et 24 % des producteurs enquêtés.

La répartition de ces différents facteurs selon les sites est mise en évidence par une analyse en composantes principales dont les deux premiers axes expliquent 85,73 % de la variance

Tableau 2 : Valeurs des contributions et des cosinus² des connaissances locales des facteurs responsables de la variabilité de surface du sol et des sites pour les deux premiers axes (F1 et F2). Les valeurs en gras des variables et des facteurs sont celles utilisées pour l'interprétation avec les axes canoniques.

Table 2 : Contribution and cosine values² of local knowledge of factors responsible for soil surface variability and sites for the first two axes (F1 and F2). The bold values of variables and factors are those used for interpretation with canonical axes.

	F1		F2	
	Contribution	Cosinus ²	Contribution	Cosinus ²
Dantiandou	14,4	0,357	42,54	0,531
Youri	19,446	0,571	2,772	0,041
Sharkin Haoussa	66,15	0,95	4,85	0,035
Safo	0,005	0	49,839	0,8
Nature du sol	0,033	0,001	26,999	0,543
Topographie	23,885	0,953	1,142	0,023
Erosion	19,343	0,771	9,231	0,186
Couvert végétal	23,668	0,944	2,409	0,048
Travail du sol	4,814	0,192	28,182	0,567
Epandage du fumier	6,143	0,245	28,825	0,58
Fourmilière	22,114	0,882	3,213	0,065

totale (figure 3). La topographie, le couvert végétal, la présence de fourmilières et l'érosion des sols sont associés aux sites de Youri et Sharkin Haoussa pour la formation de l'axe 1. La nature du sol, le travail du sol et l'épandage de fumure organique participent, avec les sites de Dantiandou et de Safo, à la formation de l'axe 2. La combinaison des variables contribuant à la formation des deux axes traduit la prédominance de l'érosion des sols dans les sites de Dantiandou et Youri, de la topographie, du couvert végétal et des fourmilières à Sharkin Haoussa et de la nature du sol et de l'épandage de fumure organique à Safo comme facteurs de la variabilité de surface du sol.

Connaissance locale et hiérarchisation des entités de surface du sol selon le potentiel de production et le niveau de fertilité

Les données d'enquête relatives à la hiérarchisation des entités homogènes de surface du sol par les producteurs selon le potentiel de production et le niveau de fertilité sont regroupées dans le tableau 3. Pour 41-67 % des personnes enquêtées, le potentiel de production et le niveau de fertilité les plus élevés sont associés aux entités de surfaces à croûtes structurales sous houppier de *Faidherbia albida* (ST-FA). Les entités à croûtes de dépôts éoliens autour des touffes de *Guiera senegalensis* (EOL-GS) arrivent en deuxième position, suivies

par les entités à croûtes de décantation (DEC) et les entités de surface à croûtes structurales associées aux fourmilières (ST-F). Le potentiel de production et le niveau de fertilité les plus faibles sont attribués aux entités de surface à croûtes d'érosion (ERO) et celles de surfaces normales à croûtes structurales (ST-SN). Les croûtes de décantation sur alluvions (DEC-AL), spécifiques au site de Safo, figurent également parmi les surfaces dont le potentiel de production et le niveau de fertilité sont considérées comme faibles.

Connaissance locale des contraintes édaphiques affectant la production de niébé

Les principales contraintes affectant la production de niébé regroupent le développement des croûtes d'érosion, le faible niveau de fertilité, l'érosion et la faible capacité de rétention en eau des sols. Sur l'ensemble des sites, 69 % de la population enquêtée identifie le faible niveau de fertilité des sols comme étant la contrainte majeure à la production de niébé. L'érosion des sols et la présence des croûtes d'érosion constituent la deuxième contrainte affectant la production de niébé identifiées par 15 % des personnes enquêtées.

Les données recueillies sur les différents sites révèlent des différences entre les contraintes spécifiques à chaque site (tableau 4). Les réponses obtenues sur les sites de Youri et Sharkin Haoussa (région de Maradi) sont conformes à la

Tableau 3 : Hiérarchisation paysanne des entités homogènes de surface du sol identifiées sur les sites en fonction de leur potentiel de production de niébé et de leur niveau de fertilité.

Table 3 : Farmer hierarchization of homogeneous soil surface identified at sites according to their cowpea production potential and their fertility level.

Entités homogènes de surface du sol	Fréquence par site (%)			
	Dantiandou	Youri	Sarkin Haoussa	Safo
ST-FA	66	60	41	54
EOL-GS	19	22	21	19
DEC	11	13	24	4
ST-SN	3	5	0	0
ERO	0	0	-	-
ST-F	-	-	14	18
DEC-AL	-	-	-	5

Tableau 4 : Proportion des contraintes édaphiques en fonction des sites selon les paysans.

Table 4 : Proportion of soil constraints depending on the sites according to the farmers.

Contraintes	Fréquence par site (%)			
	Dantiandou	Youri	Sarkin Haoussa	Safo
Développement des croûtes d'érosion	57	0	2	1
Faible niveau de fertilité	37	94	98	49
Erosion des sols	7	6	0	46
Faible capacité de rétention en eau	0	0	0	4

tendance générale observée à l'échelle de l'ensemble des sites. Entre 94 et 98 % des paysans enquêtés considèrent le faible niveau de fertilité des sols comme étant la principale contrainte entravant la production du niébé. Sur le site de Dantiandou, c'est plutôt le développement des croûtes d'érosion combiné à la faible fertilité des sols qui constitue la contrainte majeure à la production de niébé (tableau 4). Près de la moitié des paysans enquêtés sur le site de Safo reconnaît l'érosion et le faible niveau de fertilité des sols comme étant les contraintes majeures à la production de niébé (tableau 4). Sur ce site, la faible capacité de rétention en eau des sols constitue une contrainte majeure identifiée par seulement 4 % des producteurs enquêtés.

Les résultats de l'enquête sur les contraintes à la production de niébé selon les sites sont synthétisés dans une analyse en composante principale dont les deux premiers axes expliquent 99,8 % de la variabilité totale (figure 4). Le premier axe prend en compte l'érosion des sols et leur faible capacité de rétention en eau tandis que le second axe regroupe la formation des croûtes d'érosion et la baisse de la fertilité des sols (tableau 5). Les sites de Youri, Sharkin Haoussa et Safo ont contribué à la formation de l'axe 1 et le site de Dantiandou à l'axe 2. La combinaison des variables contribuant à la formation des deux axes indiquent la prédominance du développement des croûtes d'érosion sur le site de Dantiandou, le faible niveau de fertilité des sols à Youri et Sharkin Haoussa et de l'érosion des sols et la capacité de rétention en eau à Safo comme contraintes édaphiques à la production du niébé.

Pratiques locales de gestion des contraintes édaphiques affectant la production du niébé

Face aux contraintes édaphiques affectant la culture du niébé, les paysans développent un certain nombre de stratégies et de pratiques locales de gestion de culture (tableau 6). L'apport de fumure organique constitue la principale stratégie développée pour pallier les principales contraintes. Elle est pratiquée par 81 % des producteurs à l'échelle de l'ensemble des sites. En dépit de cette tendance généralisée, les données collectées révèlent des différences liées aux contraintes spécifiques et aux pratiques adaptées à chaque site. Le paillage avec les résidus de récolte ou les coupes d'arbuste mis en tas est pratiqué par 13 à 14 % des paysans enquêtés sur les sites de Dantiandou et Youri (région de Tillabéri). Ils sont seulement

Figure 4 : Analyse en composante principale des connaissances locales des contraintes édaphiques pour la production du niébé.

Figure 4 : Proportion of soil constraints depending on the sites according to the farmers.

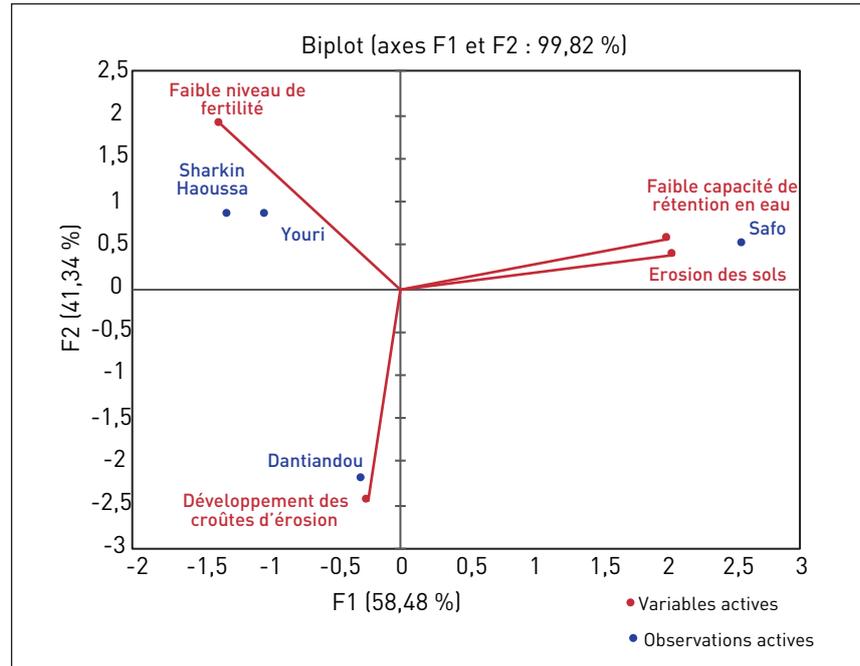


Tableau 5 : Valeurs des contributions et des cosinus² des connaissances des contraintes édaphiques sur la production du niébé et des sites pour les deux premiers axes (F1 et F2). Les valeurs en gras des variables et des facteurs sont celles utilisées pour l'interprétation avec les axes canoniques.

Table 5 : Contribution and cosine values² of knowledge of edaphic constraints on cowpea production and sites for the first two axes (F1 and F2). The bold values of variables and factors are those used for interpretation with canonical axes.

	F1		F2	
	Contribution	Cosinus ²	Contribution	Cosinus ²
Dantiandou	0,772	0,015	74,219	0,985
Youri	10,904	0,579	11,002	0,413
Sharkin Haoussa	17,788	0,699	10,62	0,295
Safo	70,535	0,96	4,158	0,04
Développement des croûtes d'érosion	0,543	0,013	59,684	0,987
Faible niveau de fertilité	17,624	0,412	35,531	0,588
Erosion des sols	41,626	0,974	1,432	0,024
Faible capacité de rétention en eau	40,207	0,94	3,353	0,055

3 % à utiliser les engrais minéraux et seuls les producteurs du site de Dantiandou pratiquent le labour profond (10 % des enquêtés). Au contraire, 14 à 19 % des producteurs des sites de Sharkin Haoussa et Safo (région de Maradi) apportent des engrais minéraux pour faire face à la faible fertilité des sols. Le paillage et le labour profond apparaissent comme des pratiques peu développées par les producteurs de la région de Maradi.

Tableau 6 : Gestion des contraintes édaphiques liées à la production du niébé**Table 6** : Management of the edaphic constraints related to cowpea production.

Stratégies	Fréquence par site (%)			
	Dantiandou	Youri	Sarkin Haoussa	Safo
Apport du fumier	73	83	85	81
Paillage	14	13	0	0
Apport d'engrais chimique	3	3	14	19
Labour profond	10	1	1	0

DISCUSSION

Connaissance locale de la variabilité de surface du sol dans les champs

Les résultats des enquêtes semi-directives menées dans deux régions agricoles sahéniennes (Tillabéri et Maradi) ont montré que la variabilité de surface du sol est une notion bien connue par les producteurs de niébé au Niger. Cette connaissance des producteurs nigériens semble être indépendante de la localisation, de la classe d'âge et du niveau de scolarité des personnes enquêtées. L'analyse des savoirs locaux sur les facteurs responsables de la variabilité de surface du sol et sur les contraintes édaphiques vis-à-vis de la production de niébé permet de distinguer des entités de surface liées à des facteurs favorables à la culture du niébé et celles associées à des facteurs défavorables. Cette distinction traduit une connaissance locale de la variabilité de surface du sol basée sur des différences de rendements, de développement des cultures, de diversité des espèces végétales et de l'état de santé du sol en termes de son aptitude culturale et du niveau de fertilité. Elle se traduit dans les pratiques culturales, que les producteurs adaptent selon la variabilité de surface observée dans leurs champs. Les critères évoqués ici pour caractériser et décrire la variabilité de surface du sol à l'échelle des champs paysans, ainsi que les facteurs à l'origine de celle-ci, sont en accord avec les résultats de nombreux travaux antérieurs consacrés à ce sujet (Kome *et al.*, 2018; Kuria *et al.*, 2018; Zingoré *et al.*, 2007; Bautista and Zink, 2010; Corbeels *et al.*, 2000; Steiner, 1998). Les agriculteurs de la région de Murewa au Zimbabwe distinguent facilement les entités les plus productives et les moins productives (Zingoré *et al.*, 2007). L'adaptation des pratiques culturales à la variabilité de surface du sol a été décrite

dans des contextes variés. Elle consiste en l'association de culture au sud-est du Mexique (Bautista et Zink, 2010), la gestion de la fertilité des sols au Kenya, (Tittonell *et al.*, 2005; 2007; Vanlauwe *et al.*, 2007), la conduite des semis, la lutte contre les maladies de culture (Vasseur *et al.*, 2013) et le travail du sol en zone soudano-sahélienne et en France (Milleville et Serpantié, 1992; Jullien et Huet, 2005, Vasseur *et al.*, 2013). Au Niger, les agriculteurs adaptent certaines pratiques comme l'association des cultures, les pratiques de gestion de la fertilité des sols et le travail du sol à la variabilité de surface du sol dans leurs champs.

Reconnaissance des entités favorables à la culture du niébé

La présence de certains arbres *et arbustes* constitue le premier critère identifié par les producteurs du Niger pour la reconnaissance des entités homogènes favorables à la culture du niébé. Ainsi identifient-ils les surfaces à croûtes structurales sous houppier de *Faidherbia albida* et les surface de buttes à croûtes de dépôts éoliens autour des touffes de *Guiera senegalensis* comme les surfaces les plus productives et les plus fertiles. Certaines surfaces associées à des espèces d'arbres comme *Accacia senegal*, *Piliostigma reticulatum* ou d'arbuste comme *Annona senegalensis* sont connues aussi en zone sahénienne pour les mêmes aptitudes que les précédentes. Ces surfaces sont considérées par les agriculteurs comme des niches ou des îlots de fertilité auxquelles ils accordent une importance particulière. La présence de végétaux est connue pour modifier localement la répartition spatiale des nutriments, de la matière organique et de l'eau (Titus *et al.*, 2002). Ceux-ci s'enrichissent chimiquement en concentrant les flux de nutriments associés à la chute des feuilles, à la décomposition de la litière, aux déjections animales, aux dépôts éoliens et hydriques (Bielders *et al.*, 2004; Dan Lamso *et al.*, 2015a, 2015b; Farji-Brener and Werenkraut, 2017). Ces différents processus sont responsables de l'intérêt de la gestion des arbres et des arbustes par les agriculteurs telle que la régénération naturelle assistée (RNA) et, de façon plus large, les pratiques d'agroforesterie pour la réhabilitation des terres, la lutte contre l'appauvrissement des sols et l'amélioration de la production des cultures (Abdou *et al.*, 2014; Dan Lamso *et al.*, 2015c).

Les entités de surface à croûtes structurales associées aux fourmillières font également partie des surfaces identifiées par les producteurs nigériens comme des surfaces productives et fertiles. Cet aspect du savoir local des producteurs nigériens est conforme à l'impact positif attribué aux fourmis et aux termites sur leurs activités de récolte (alimentation) et de remobilisation des sols (bioturbation). Leurs activités favorisent l'infiltration de l'eau et jouent également un rôle important dans le recyclage et la décomposition des résidus végétaux. Elles augmentent

ainsi la teneur en matière organique, en azote, en phosphore et en potassium des sols (Folgarait, 1998; Dostál et al., 2005, Farji-Brener and Werenkraut, 2017). A travers la construction de galeries souterraines et la formation de monticules, les fourmis et les termites contribuent à la restructuration des horizons pédologiques par le mélange continu des matériaux, l'augmentation de la porosité, du drainage et de l'aération du sol, la réduction de la densité apparente, la modification de la texture et de la structure du sol, favorables au développement des cultures (Dostál et al., 2005).

Reconnaissance des entités défavorables à la culture du niébé

A l'inverse, les surfaces les moins fertiles et les moins productives sont les surfaces à croûtes d'érosion et les surfaces normales de champ cultivé à croûtes structurales. Ces surfaces subissent régulièrement le décapage irrégulier de la partie supérieure de la surface du sol et le départ de nutriments associés (Biielders et al., 2004). Elles sont considérées comme des surfaces appauvries ou épuisées. La redistribution spatiale des nutriments alimente les îlots fertiles qui recueillent au sein d'une même parcelle agricole les particules et les éléments nutritifs transportés par l'eau ou le vent (Brouwer et al., 1993; Biielders et al., 2004; Bationo et al., 2012). Les pertes continues en particules et en nutriments rendent davantage ces surfaces très sensibles à l'encroûtement superficiel, augmentent la densité apparente et diminuent la porosité et l'infiltration des sols dans l'Ouest nigérien (Biielders et al., 2002). Ces auteurs ont montré que ces contraintes augmentent la résistance du sol à la pénétration racinaire des cultures comme le mil et le niébé.

Les variations des propriétés des sols et des rendements dans les parcelles agricoles sont souvent attribuées à des différences dans la topographie et la microtopographie (Kravchenko and Bullock, 2000; Kaspar et al., 2003; Guo et al., 2012). Des études antérieures conduites dans l'Ouest nigérien par Geiger et Manu (1993) ont montré que la croissance et le rendement de certaines cultures comme le mil, sont meilleurs sur des positions microtopographiques hautes et alors qu'ils sont faibles au niveau des surfaces basses. Les positions microtopographiques hautes sont en général des bombements sableux issus d'accumulation autour des espèces végétales dominantes (*Guiera senegalensis*, *Combretum glutinosum* ou *Piliostigma reticulatum*). Les positions microtopographiques basses correspondent souvent à des surfaces décapées par l'érosion. Elles peuvent également correspondre à des surfaces concaves où convergent les eaux de ruissellement. Elles sont alors défavorables aux cultures sensibles à l'anoxie en particulier durant des épisodes pluvieux intenses (Tourino-Soto, 2005). Les agriculteurs de la zone de Safo considèrent les entités à croûtes de décantation sur alluvions comme étant des

surfaces à faible potentiel de production de niébé malgré le fait qu'elles soient connues pour leur richesse en éléments nutritifs. Ils expliquent ces observations par l'inondation de ces surfaces et l'endommagement des cultures de niébé durant la saison des pluies. Une forte humidité est néfaste pour le niébé car elle est toujours accompagnée d'un sévère développement de maladies (Adam, 1986).

Stratégie de gestion des entités défavorables à la culture du niébé

Face aux contraintes édaphiques spécifiques, les paysans adoptent un certain nombre de stratégies principalement appliquées sur les surfaces les moins productives dans leurs parcelles. L'application de fumure organique dans les zones à contraintes constitue la principale stratégie contre l'encroûtement et la baisse de la fertilité du sol. Blanchard et al., (2014) ont montré que l'apport de fumure organique est la solution la plus efficace pour maintenir la fertilité et la durabilité des systèmes de production sur tous les types de sol en Afrique de l'Ouest. Brouwer et Powell (1995), De Rouw (1998), Ambouta et Moussa (2004) et Zeinabou et al. (2014) ont montré l'importance de l'utilisation de fumure organique dans les champs pour l'amélioration de la qualité du sol et l'augmentation des rendements des cultures. Cependant, les contraintes de disponibilité de fumure organique et de moyens de transport (Amoukou et al., 2007) limitent le recours à cette pratique à des apports occasionnels ou dans les champs situés à proximité des villages (Issaka, 2001; Tittonell et al., 2007).

Le paillage constitue la seconde stratégie paysanne pour lutter contre l'encroûtement et la baisse de la fertilité des sols. Cette pratique est particulièrement répandue dans la région de Tillabéri où le développement des croûtes d'érosion constitue la principale contrainte à la culture de niébé. Le paillage est réputé pour la protection des sols contre l'érosion et le développement des croûtes d'érosion (Biielders et al., 2004; Abdourhamane Touré, 2011; Lahmar et al., 2012; Rajot et al., 2013) mais aussi pour l'amélioration des rendements agricoles dans les champs paysans (Yamba, 2016). Cette pratique est peu utilisée dans les régions où se pratique le ramassage des résidus de cultures pour nourrir le bétail par l'Homme. C'est le cas de la région de Maradi où la forte démographie conduit en plus de l'alimentation du bétail, à l'utilisation alternative et excessive des résidus des cultures par la vente, la construction et pour l'énergie.

Dans la région de Maradi, les producteurs utilisent les engrais chimiques pour contourner les contraintes liées au faible niveau de fertilité. La proximité du Nigeria et l'apparition des grands projets de développement ont favorisé l'utilisation de ces engrais (Yamba, 2004). Le recours à cette solution d'amélioration de la fertilité des sols et des rendements des cultures reste néanmoins limité par le faible pouvoir d'achat des agriculteurs (Issaka, 2001).

CONCLUSION

Les résultats de la présente étude ont montré que la variabilité de surface du sol est une notion bien connue par les producteurs nigériens de niébé. Cette variabilité est liée à l'hétérogénéité du rendement des cultures au sein des parcelles agricoles. Les producteurs différencient et hiérarchisent les entités de surface du sol selon leur potentiel de production et de niveau de fertilité. Les contraintes des sols spécifiques aux entités peu ou pas productives sont, selon les agriculteurs, la baisse de la fertilité des sols, l'encroûtement et l'érosion des sols. Sur ces surfaces présentant des contraintes, ils adoptent plusieurs stratégies pour restaurer le niveau de fertilité, la plus utilisée étant l'application de fumure organique.

Ces résultats faciliteront le dialogue entre les producteurs et les scientifiques dans la recherche de solutions pour améliorer la production de niébé sur les sols à forte hétérogénéité de surface en Afrique dans le reste du monde.

REMERCIEMENTS

Les auteurs remercient le Programme de Productivité Agricole en Afrique de l'Ouest (PPAAO) à travers le financement du projet de recherche COPRONNIGER dans lequel s'inscrit ce travail, la coopération française au Niger et la SFR RACINES pour les bourses de mobilité au GEGENAA de l'Université de Reims Champagne Ardenne et l'IRD de Bondy. Les auteurs remercient toutes les personnes ayant permis la collecte des données. Les auteurs remercient également Mr Aliou Saidou pour sa relecture, les commentaires et corrections apportés, qui ont permis d'améliorer significativement la qualité de cet article.

BIBLIOGRAPHIE

Abdou M. M., Mayaki Z. A., Kadri A., Ambouta J. M. et Lamso N. D., 2013 - Effet de l'arbre *Acacia senegal* sur la fertilité des sols de gommerais au Niger. *International Journal of Biological and Chemical Sciences*, 7 (6), 2328-2337.

Abdou M. M., Mayaki Z. A., Lamso N. D., Seybou D. E. et Ambouta J. M. K., 2014 - Productivité de la culture du sorgho (*Sorghum bicolor*) dans un système agroforestier à base d'*Acacia senegal* (L.) Willd. au Niger. *Journal of Applied Biosciences*, 82 (1), 7339-7346.

Abdou M. M., Issa, S., Mani M. et Sawadogo G. J., 2016 - Diversité des pratiques d'intégration agriculture-élevage dans les exploitations familiales du sud de la région de Maradi (Niger) et perspectives. *Agronomie Africaine*, 28 (1), 70-80.

Abdourhamane Touré A., 2011 - Erosion en milieu sableux cultivé au Niger: dynamique actuelle et passée en liaison avec la pression anthropique et les changements climatiques. Thèse de doctorat, Université de Bourgogne. 224 p.

Abril A., Villagra P. and Noe L., 2009 - Spatiotemporal heterogeneity of soil fertility in the Central Monte desert (Argentina). *Journal of Arid Environment*, 73, 901-906.

Adam T., 1986 - Contribution à la connaissance des maladies du niébé au Niger avec mention spéciale au *Macrophomina phaseolina*. Thèse de Docteur Ingénieur en Sciences Agronomiques, Université de Rennes, 128 p.

Ambouta J. M. K., Valentin C. et Laverdière M. R., 1996 - Jachères et croûtes d'érosion au Sahel. *Science et changements planétaires/Sécheresse*, 7 (4), 269-275.

Ambouta K. J. M., Amadou, I. et Souley I., 1998 - Gestion de la fertilité et évolution des sols de Gakudi (Maradi, Niger). *Cahiers Agricultures*, 7 (5), 395-400.

Ambouta J. M. K. et Moussa I. B., 2004 - Expériences de récupération de sols sahéliens dégradés grâce à l'incorporation de doses variables de fumier et d'un hydro-rétenteur fertilisant. *Science et changements planétaires/Sécheresse*, 15 (1), 49-55.

Amoukou I., Yamba B., Marichatou H. et Yayé A. D., 2007 - Vulnérabilité et innovations paysannes: l'expérience d'Agué au Niger. Presses universitaires de Louvain, Louvain-la-Neuve, Belgique, 114 p.

Bado B. V., 2002 - Rôle des légumineuses sur la fertilité des sols ferrugineux tropicaux des zones guinéenne et soudanienne du Burkina Faso. Thèse de doctorat, Université Laval, Québec, 197 pages.

Bado B. V., Bationo A. and Cesca M. P., 2006 - Assessment of cowpea and groundnut contributions to soil fertility and succeeding sorghum yields in the Guinean savannah zone of Burkina Faso (West Africa). *Biology and Fertility of Soils*, 43 (2), 171-176.

Bagayoko M., Buerkert A., Lung G., Bationo A. and Römhild V., 2000 - Cereal/legume rotation effects on cereal growth in Sudano-Sahelian West Africa: soil mineral nitrogen, mycorrhizae and nematodes. *Plant and soil*, 218 (1-2), 103-116.

Bautista F. and Zinck J. A., 2010 - Construction of an Yucatec Maya soil classification and comparison with the WRB framework. *Journal of ethnobiology and ethnomedicine*, 6 (1), 7. doi:10.1186/1746-4269-6-7

Batchelor W., Bruno Basso B. and Paz O J., 2002 - Examples of strategies to analyze spatial and temporal yield variability using crop models. *European Journal of Agronomy*, 18 (2002) 141-158.

Bationo B.A., Kalinganire A et Bayala J., 2012 - Potentialités des ligneux dans la pratique de l'agriculture de conservation dans les zones arides et semi-arides de l'Afrique de l'Ouest: Aperçu de quelques systèmes candidats. ICRAF Technical Manual n°17 Nairobi: World Agroforestry Centre, 50 p.

Bielders C. L., Michels K. and Bationo A., 2002 - On-farm evaluation of ridging and residue management options in a Sahelian millet-cowpea intercrop. 1. Soil quality changes. *Soil Use and Management*, 18 (3), 216-222.

Bielders C. L., Rajot J. L. et Michels, K., 2004 - L'érosion éolienne dans le Sahel nigérien: influence des pratiques culturales actuelles et méthodes de lutte. *Science et changements planétaires/Sécheresse*, 15 (1), 19-32.

Blanchard M., Coulibaly K., Bognini S., Dugué, P. et Vall, É., 2014 - Diversité de la qualité des engrais organiques produits par les paysans d'Afrique de l'Ouest: quelles conséquences sur les recommandations de fumure ? *Biotechnologie, Agronomie, Société et Environnement*, 18 (4), 512-523.

Boffa J.-M., 2000 - Les parcs agroforestiers en Afrique subsaharienne. *Cahier FAO, Conservation* 34, 42-190.

Bouzou M. I. et Yamba B., 2008 - Savoirs locaux et gestion des écosystèmes sahéliens. *Cahiers d'Outre-Mer*, 61, 241-242.

Brouwer J., Fussell L. K. and Hermann L., 1993 - Soil and crop growth micro-variability in the West African semi-arid tropics: a possible risk-reducing factor for subsistence farmers. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 45 (1993) 229-238.

Brouwer J. and Powell J. M., 1995 - Soil aspects of nutrient cycling in a manure application experiment in Niger. In: *International Conference on Livestock and Sustainable Nutrient Cycling in Mixed Farming Systems of Sub-Saharan Africa*, Addis Ababa (Ethiopia), 22 to 26 November 1993.

- Brouwer J., 2008 - Within-field soil and crop growth variability: Its importance to improving food production in a changing Sahel. IUCN Commission on Ecosystem Management. 13 p.
- Casenave A. et Valentin C., 1989 - Les états de surface de la zone sahélienne: influence sur l'infiltration. Didactiques, ORSTOM (ed.), Paris. 229 pp.
- CNEDD (Conseil National de l'Environnement pour un Développement Durable), 2004 - Étude prospective afin d'évaluer les tendances des secteurs LCD-GRN Régions de Tillabéri et de Maradi (Niger) à l'horizon 2025. 156 p.
- Corbeels M., Shiferaw A. and Haile M., 2000 - Farmers' knowledge of soil fertility and local management strategies in Tigray, Ethiopia. Institute for Environment and Development London UK, Managing Africa's Soils, n°10, 30 p.
- Coulibaly K., Gomgnimbou A. P. K., Traoré M., Nacro H. B. et Sedogo M. P., 2017 - Effets des associations maïs-légumineuses sur le rendement du maïs (*Zea mays* L.) et la fertilité d'un sol ferrugineux tropical à l'Ouest du Burkina Faso. *Afrique SCIENCE*, 13 (6), 226-235.
- Cruz C., Bio A. M., Jullioti A., Tavares A., Dias, T. et Martins-Loução M. A., 2008 - Heterogeneity of soil surface ammonium concentration and other characteristics, related to plant specific variability in a Mediterranean-type ecosystem. *Environmental Pollution*, 154 (3), 414-423.
- Dabat M-H. et Richard. G. 2012 - La culture du niébé au Burkina Faso: une voie d'adaptation de la petite agriculture à son environnement ? *Autrepart*, 3/2012 (n°62), 95-114.
- Dan Lamso N., Guero Y., Dan-Badjo A. T., Tidjani A. D., Maman N. A. et Ambouta J.M.K., 2015a - Effet des touffes de *Guiera senegalensis* (JF Gmel) sur la fertilité des sols dans la région de maradi (Niger). *Journal of Applied Biosciences*, 94, 8844-8857.
- Dan Lamso N., Guero Y., Dan-Badjo A. T., Tidjani A. D., Maman N. A., et Ambouta J.M.K., 2015b - Effet des touffes de *Guiera senegalensis* sur la production du mil dans la région de Maradi (NIGER). *Revue des Bioressources*, 5 (2), 1-13.
- Dan Lamso N., Guero Y., Dan-Badjo A. T., Lamar R., Bationo B. A., Djamen P. et Ambouta J.M.K., 2015c - Effet des touffes de *Hyphaene thebaica* (Mart) sur la production du mil dans la région de Maradi (Niger). *International Journal of Biological and Chemical Sciences*, 9 (5), 2477-2487.
- De Rouw, A. 1997 - Gestion de la fertilité des sols pour la culture du mil au Niger. Actes de l'atelier Jachère et maintien de la fertilité, Bamako 2-4 Octobre 1997, 7-87.
- De Rouw A., 1998 - Gestion de la fertilité du sol sur un terroir sahélien. Fumure animale, matière organique et encroûtement superficiel du sol dans les systèmes de culture de mil, étude au Niger. *Agriculture et Développement*, numéro spécial Science du sol, n°18, 63-70.
- Diop I., Kane A., Krasova-Wade Y., Sanon K. B., Houngnandan P., Neyra M et Noba K., 2013 - Impacts des conditions pédoclimatiques et du mode cultural sur la réponse du niébé (*Vigna unguiculata* L. Walp.) à l'inoculation endomycorhizienne avec *Rhizoglyphus irregularis*. *Journal of Applied Biosciences*, 69, 5465-5474.
- Djenontin J. A., Wennink B., Dagbenongbakin, G. et Ouinkoun G., 2003 - Pratiques de gestion de fertilité dans les exploitations agricoles du Nord-Bénin. Dans *Savanes africaines: des espaces en mutation, des acteurs face à de nouveaux défis*. Actes du colloque, Garoua, Cameroun, Cirad-Prasac, 9 p.
- Dostál P., Březnová M., Kozlíčková V., Herbena T. and Kovář P., 2005 - Ant-induced soil modification and its effect on plant below-ground biomass. *Pedobiologia*, 49, 127-137.
- Farji-Brener A. G. and Werenkraut V., 2017 - The effects of ant nests on soil fertility and plant performance: a meta-analysis. *Journal of Animal Ecology*, 86 (4), 866-877.
- Folgarait P.J., 1998 - Ant biodiversity and its relationship to ecosystem functioning: a review. *Biodiversity & Conservation*, 7, 1221-1244.
- Gandah M., Stein A., Brouwer J. and Bouma J., 2000- Dynamics of spatial variability of millet growth and yields at three sites in Niger, West Africa and implications for precision agriculture research. *Agricultural Systems*, 63 (2), 123-140.
- Geiger S. C. and Manu A., 1993 - Soil surface characteristics and variability in the growth of millet in the plateau and valley region of Western Niger. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 45 (3-4), 203-211.
- Guengant J. P., Banoin M. et Quesnel A., 2003 - Dynamique des populations, disponibilités en terres et adaptation des régimes fonciers: le cas du Niger. CICRED, Comité International de Coopération dans les Recherches nationales en Démographie. 144 p.
- Guo W., Maas S.J. and Bronson K.F., 2012 - Relationship between cotton yield and soil electrical conductivity, topography, and Landsat imagery. *Precision Agriculture* 13, 678. <https://doi.org/10.1007/s11119-012-9277-2>.
- Harper J. L., Williams J. T. and Sagar G. R., 1965 - The behaviour of seeds in soil: I. The heterogeneity of soil surfaces and its role in determining the establishment of plants from seed. *The Journal of Ecology*, 53 (2) 273-286.
- Hien E., Ganry F., Hien V. et Oliver R., 2003 - Dynamique du carbone dans un sol de savane du Sud-Ouest Burkina sous l'effet de la mise en culture et des pratiques culturales In: *Savane africaine: des espaces en mutation, des acteurs face à de nouveaux défis*. Actes du colloque, Garoua, Cameroun (pp. 11p). Cirad-Prasac.
- INS (Institut National de la Statistique du Niger), 2010 - Annuaire Statistique des indépendances du Niger, spéciale 201, 338 p.
- INS (Institut National de la Statistique du Niger), 2016 - Annuaire Statistique 2011-2015, édition 2016 - INS-Niger, 254 p.
- Issaka M., 2001 - Evolution à long terme de la fertilité du sol dans la région de Maradi. *Drylands Research Working Paper No. 30*, Drylands Research, Crewkerne, United Kingdom. 44 p.
- IUSS Working Group WRB., 2015 - Base de référence mondiale pour les ressources en sols 2014, Mise à jour 2015. Système international de classification des sols pour nommer les sols et élaborer des légendes de cartes pédologiques. Rapport sur les ressources en sols du monde n° 106, FAO, Rome.
- Jullien A. et Huet P., 2005 - Agriculture de précision. *Agricultures et territoires*, Lavoisier, Paris, France, 223-238.
- Kaspar T. C., Colvin T. S., Jaynes D. B., Karlen D. L., James D. E., Meek D. W. and Butler H., 2003 - Relationship between six years of corn yields and terrain attributes. *Precision Agriculture*, 4 (1), 87-101.
- Kome G. K., Enang R. K. and Yerima B. P. K., 2018- Knowledge and management of soil fertility by farmers in western Cameroon. *Geoderma Regional*, 13, 43-51.
- Kuria A. W., Barrios E., Pagella T., Muthuri C. W., Mukuralinda A. and Sinclair F. L., 2018 - Farmers' knowledge of soil quality indicators along a land degradation gradient in Rwanda. *Geoderma Regional*, (15) 2018 e00199.14p.
- Kravchenko A. N. and Bullock D. G., 2000 - Correlation of corn and soybean grain yield with topography and soil properties. *Agronomy Journal*, 92 (1), 75-83.
- Lahmar R., Bationo B. A., Dan Lamso N., Guéro Y. and Tifton P., 2012 - Tailoring conservation agriculture technologies to West Africa semi-arid zones: building on traditional local practices for soil restoration. *Field Crops Research*, 132, 158-167.
- Madjigoto R. et Gounel C., 2003 - Les effets de l'exploitation pétrolière dans la zone agricole des savanes du sud du Tchad: étude d'impact sur l'environnement des populations. In *Savane africaine: des espaces en mutation, des acteurs face à de nouveaux défis*. Actes du colloque, Garoua, Cameroun (pp. 7 p). Cirad-Prasac.
- Malam Abdou M., Vandervaere J. P., Bouzou-Moussa I., Descroix L., Mamadou I. et Faran-Maiga O., 2016 - Genèse des écoulements sur deux petits bassins versants cristallins de l'Ouest du Niger: approche multi-échelles

- du fonctionnement hydrodynamique. *Géomorphologie: Relief, Processus, Environnement*, 22 (4), 363-375.
- Milleville P. et Serpantié G., 1992 - Regards sur l'élaboration de la production agricole en agriculture paysanne tropicale. Problèmes de méthode. Statistique impliquée, 107- 124, Collection Colloques et Séminaires. ORSTOM, Paris.
- Moumouni D. A., Doumma A. et Sembene M., 2013 - Influence des zones agro-écologiques sur les paramètres biologiques de *Callosobruchus maculatus* (Coleoptera-Bruchidea), ravageurs des graines du niébé (*Vigna unguiculata* Walp.) au Niger. *International Journal of Biological and Chemical Sciences*, 7 (5), 1866-1876.
- Moussa B. M., Diouf A., Abdourahmane S. I., Axelsen J. A., Ambouta J.M.K. and Mahamane A., 2016 - Combined traditional water harvesting (Zai) and mulching techniques increase available Soil phosphorus content and millet yield. *Journal of Agricultural Science*, 8 (4), 126.
- Mulla D. J., 2013 - Twenty five years of remote sensing in precision agriculture: Key advances and remaining knowledge gaps. *Biosystems Engineering*, 114 (4), 358-371.
- Mzuku M., Khosi R., Reich R., Inman D., Smith F. and MacDonald L., 2005 - Spatial variability of measured soil properties across site-specific management zones. *Soil Science Society of America Journal*, 69 (5), 1572-1579.
- Ouédraogo S., 2005 - Intensification de l'agriculture dans le Plateau Central du Burkina Faso: une analyse des possibilités à partir des nouvelles technologies. Thèse de doctorat, Centre for Development Studies, University of Groningen, 332 p.
- Rajot J. L., Abdourahmane Touré A., Garba Z., Guillon R., Tidjani A., Marticorena B. et Sebag D., 2013 - Six années de suivi du flux d'érosion éolienne sur un sol sableux cultivé au Sahel: Impacts des résidus de culture et de l'encroûtement. *Etude et Gestion des sols*, 20 (2), 57-69.
- Roose E., 1989 - Gestion conservatoire des eaux et de la fertilité des sols dans les paysages soudano-sahéliens de l'Afrique Occidentale. *Soil, Crop and Water Management Systems for Rainfed Agriculture in the Sudano-Sahelian Zone*. International Crops Research Institute for the Semi-Arid Tropics (ICRISAT), Patancheru, India, 55-72.
- Steiner K. G., 1998- Using farmers' knowledge of soils in making research results more relevant to field practice: Experiences from Rwanda. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 69 (3), 191-200.
- Thiombiano L., 2000 - Etude de l'importance des facteurs édaphiques et pédopaysagiques dans le développement de la désertification en zone sahélienne du Burkina Faso. Thèse d'État, Université de Cocody, République de Côte d'Ivoire. 219 p.
- Tittonell P., Vanlauwe B., Leffelaar P. A., Rowe E. C. and Giller K. E., 2005- Exploring diversity in soil fertility management of smallholder farms in western Kenya: I. Heterogeneity at region and farm scale. *Agriculture, Ecosystems & environment*, 110 (3-4), 149-165.
- Tittonell P., Shepherd K. D., Vanlauwe B. and Giller K. E., 2007- Unravelling the effects of soil and crop management on maize productivity in smallholder agricultural systems of western Kenya-An application of classification and regression tree analysis. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 123 (1-3), 137-150.
- Tittonell P., Muriuki A., Klapwijk C. J., Shepherd K. D., Coe, R. and Vanlauwe B., 2013 - Soil heterogeneity and soil fertility gradients in smallholder farms of the East African highlands. *Soil Science Society of America Journal*, 77 (2), 525-538.
- Titus J. H., Nowak R. S. and Smith S. D., 2002 - Soil resource heterogeneity in the Mojave Desert. *Journal of Arid Environments*, 52 (3), 269-292.
- Tourino-Soto, I. 2005 - Mise en relation de la cartographie du rendement avec la distribution spatiale de l'état de surface du sol observée par télédétection. Application dans un contexte d'agriculture de précision. Thèse de doctorat, Université de Toulouse. 250 p.
- Turner, M. D. and Hiernaux P., 2015 - The effects of management history and landscape position on inter-field variation in soil fertility and millet yields in southwestern Niger. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 211, 73-83.
- Valentin C., Rajot J.-L. and Mitja D., 2004 - Responses of soil crusting, runoff and erosion to fallowing in the sub-humid and semi-arid regions of West Africa. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 104 (2), 287-302.
- Vanlauwe B., Tittonell P. and Mukalama J., 2007- Within-farm soil fertility gradients affect response of maize to fertiliser application in western Kenya. *Nutrient Cycling in Agroecosystems*, 76 (2006), pp. 171-182
- Vasseur C., Joannon A., Aviron S., Burel F., Meynard J. M., and Baudry J., 2013 - The cropping systems mosaic: How does the hidden heterogeneity of agricultural landscapes drive arthropod populations? *Agriculture, ecosystems & environment*, 166, 3-14.
- Voortman R. L., Brouwer J. and Albersen P. J., 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.
- Warren A., Batterbury S. P. J. and Osbahr H., 2001 - Soil erosion in the West African Sahel: a review and an application of a local political ecology approach in South West Niger. *Global Environmental Change-Human and Policy Dimensions*, 11, 79-95.
- Wezel A., Rajot J. L. and Herbrig C., 2000 - Influence of shrubs on soil characteristics and their function in Sahelian agro-ecosystems in semi-arid Niger. *Journal of Arid Environments*, 44 (4), 383-398.
- Yamba B., 2004- Les mutations des systèmes agraires et des modes d'usage des ressources naturelles dans la zone centrale du Niger/Changes in agrarian systems and types of natural resource use in the central area of Niger. *Revue de Géographie Alpine*, 92 (1), 97-110.
- Yamba B., 2016 - Land and natural resource governance: development issues and anti-desertification initiatives in Niger. In *The End of Desertification? Disputing environmental change in the drylands*, edited by: Behnke, R. H. and Mortimore, M., Springer, Berlin, 179-200, 2016.
- Yaméogo G., Yélémo B. et Traoré D. 2005 - Pratique et perception paysannes dans la création de parc agroforestier dans le terroir de Vivalogo (Burkina Faso). *Biotechnologie, Agronomie, Société et Environnement* 4: 241- 248.
- Zingore S., Murwira H. K., Delve R. J. and Giller K. E., 2007 - Influence of nutrient management strategies on variability of soil fertility, crop yields and nutrient balances on smallholder farms in Zimbabwe. *Agriculture, Ecosystems et Environment*, 119 (1-2), 112-126.
- Zingore S., Tittonell P., Corbeels M., Van Wijk M. T. and Giller K. E., 2011- Managing soil fertility diversity to enhance resource use efficiencies in smallholder farming systems: a case from Murewa District, Zimbabwe. *Nutrient Cycling in Agroecosystems*, 90 (1), 87-103.
- Zeinabou H., Mahamane S., Bismarck N. H., Bado B. V., Lompo F. et Bationo A., 2014 - Effet de la combinaison des fumures organo-minérales et de la rotation niébé-mil sur la nutrition azotée et les rendements du mil au sahel. *International Journal of Biological and Chemical Sciences*, 8 (4), 1620-1632.