HAL
open science

Hétérogénéité spatiale et fonctionnelle de la surface du sol et son influence sur la production du niébé dans les exploitations familiales au Niger

Bachirou Seyni Bodo

To cite this version:

Bachirou Seyni Bodo. Hétérogénéité spatiale et fonctionnelle de la surface du sol et son influence sur la production du niébé dans les exploitations familiales au Niger. Sciences de la Terre. URCA - GEGENAA, 2019. Français. NNT : 2019REIMS054 . tel-03494989

HAL Id: tel-03494989

https://hal.univ-reims.fr/tel-03494989

Submitted on 12 Nov 2023

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

UNIVERSITÉ DE REIMS CHAMPAGNE-ARDENNE

ÉCOLE DOCTORALE : AGRICULTURE, ALIMENTATION, BIOLOGIE, ENVIRONNEMENT, SANTE (ABIES)

THÈSE EN CO-TUTELLE

Pour obtenir le grade de

DOCTEUR DE L'UNIVERSITE ABDOU MOUMOUNI DE NIAMEY

Discipline : **Agro pédologie**

Et

DOCTEUR DE L'UNIVERSITÉ DE REIMS CHAMPAGNE-ARDENNE

Discipline : ***SCIENCES AGRONOMIQUES, BIOTECHNOLOGIES AGRO-ALIMENTAIRES***

Spécialité : Science du sol

Présentée et soutenue publiquement par

Bachirou SEYNI BODO

Le 18 septembre 2019

Hétérogénéité spatiale et fonctionnelle de surface du sol et son influence sur la production du niébé dans les exploitations familiales au Niger

Thèse dirigée par M. Jean-Marie Karimou AMBOUTA**, UNIVERSITE ABDOU MOUMOUNI DE NIAMEY**

Et par M. Gilles FRONTEAU**, UNIVERSITE DE REIMS CHAMPAGNE-ARDENNE**

JURY

M. Oumarou MALAM ISSA	Directeur de Recherche	UMR 242 iEES-Paris	**Président**
M. Christian WALTER	Professeur	UMR SAS, INRA/Agrocampus Ouest (Rennes)	**Rapporteur**
M. Yadji GUERO,	Professeur	Université Abdou Moumouni de Niamey	**Rapporteur**
Mme Béatrice MARIN	Professeure	Université de Reims Champagne-Ardenne	**Examinatrice**
M. Jean-Marie Karimou AMBOUTA,	Professeur	Université Abdou Moumouni de Niamey	**Co-Directeur de thèse**
M. Gilles FRONTEAU,	Maître de Conférences HDR	Université de Reims Champagne-Ardenne,	**Co-Directeur de thèse**
M. Xavier MORVAN	Maître de Conférences	Université de Reims Champagne-Ardenne	**Co-Encadrant**

AVANT-PROPOS

Cette thèse de doctorat a été réalisée en cotutelle entre l'Université de Reims Champagne-Ardenne (URCA) et l'Université Abdou Moumouni de Niamey (UAM). Elle s'inscrit dans le cadre du projet de recherche COPRONNIGER (COntraintes socio-environnementales liées à la PROduction du Niébé au NIGER) financé par la Banque Mondiale à travers le Programme de productivité en Afrique de l'Ouest (PPAAO).

Elle a été préparée en alternance au sein du département de Science du sol (FA/UAM), le laboratoire Groupe d'Etude sur les Géomatériaux et Environnements Naturels, Anthropiques et Archéologiques (EA 3795) du pôle Agro-sciences, Environnement, Biotechnologie et Bio-économie de l'URCA et l'Institut de Recherche pour le Développement (IRD) de la représentation du Niger et de la délégation des îles de France de Bondy au sein de l'UMR 242 iEES-Paris.

Cette thèse a aussi bénéficié de la bourse d'étude de la coopération française au Niger qui a permis mon inscription à l'URCA et le financement de mes trois séjours doctoraux au sein du GEGENAA (URCA). Ma mobilité à l'UMR 242 iEES-Paris a été financée par la SFR RACINES du Niger.

Je suis reconnaissant à la faculté d'Agronomie (UAM) et la représentation de l'IRD au Niger pour la logistique et les meilleures conditions de travail dans le cadre de cette thèse.

Ma reconnaissance va également à l'état du Niger pour le financement de tout mon parcours académique.

DEDICACE

A mon père, Bodo Seyni

Ma mère, Fati Souley

A mon épouse, Hadjara Abdou Djiribani

A mon fils, Kaocen

A mes frères et sœurs

REMERCIEMENTS

C'est enfin l'heure du remerciement ! Au terme cette thèse, je souhaite remercier toutes les personnes qui ont participé à son aboutissement.

Dans un premier temps, je remercie Pr Oumarou Malam Issa d'avoir accepté la présidence de mon Jury de thèse. Les mots manqueront certainement de te remercier, mais on y va. Il est celui qui m'a initié dans la recherche depuis 2010 sur les questions de croûtes microbiotiques et depuis, il a continué à me suivre et m'encadrer jusqu'à cette thèse. Cette thèse n'aura jamais vu le jour sans son implication personnelle pour avoir grandement assuré les bonnes conditions de son déroulement. En plus, cette thèse ne serait pas réalisée en cotutelle s'il ne s'était pas investi depuis la rédaction du projet de doctorat et dans les démarches de demande de bourse de mobilité. Il m'a fait confiance et m'a enseigné son amour du travail, sa rigueur scientifique et surtout la persévérance dans les projets. Sa Ta capacité d'analyse et de proposition méritent d'être notée. Il m'a aussi ouvert les portes de sa famille et de passage je remercie Gwenola et les enfants pour les moments passés ensembles. Oumarou, trouve ici, l'expression de ma profonde reconnaissance et gratitude.

Pr Jean-Marie Karimou Ambouta, pour avoir accepté de diriger cette thèse. Il me plait de le rappeler que vous êtes mon encadrant depuis de ma maitrise et en Master en Sciences agronomiques et sans hésitation aucune, vous avez accepté de diriger ce travail de thèse. Avec vous, j'ai appris la rigueur scientifique, la méthode de travail et l'esprit de critique scientifique. Comme un père, votre disponibilité, vos conseils et encouragements m'ont permis de bien avancer dans mes projets. Pr. Ambouta, trouvez ici l'expression de ma profonde gratitude.

Christian Walter, professeur à Agrocampus Ouest de Rennes et Pr Guéro Yadji de l'université Abdou Moumouni de Niamey pour avoir accepté d'être rapporteurs de cette thèse malgré leurs multiples préoccupations. Qu'ils trouvent ici toute ma reconnaissance.

A Béatrice, merci d'accepter d'être l'examinatrice de cette thèse. Je suis très reconnaissant de tout ce que tu as fait pour moi durant mes séjours. Avec toi j'ai appris qu'il faut absolument bien faire les choses. J'ai aussi ***le c… bordé de nouille*** comme tu préfères le dire, de t'avoir comme amie.

Dr. HDR Gilles Fronteau, je te remercie chaleureusement d'accepter de diriger cette thèse. Tu as été très disponible et très opérationnel dans les démarches de cette thèse. Avec lui, j'ai appris le traitement de données de colorimétrie et que tout problème a une solution. Gilles trouve ici toute ma reconnaissance.

Je suis reconnaissant au Professeur Vincent Barbin pour m'avoir accueilli au de son équipe le GEGENAA et d'avoir œuvré toujours pour me faciliter les démarches administratives.

Dr Adamou Didier Tidjani, coordonnateur du projet COPRONNIGER, je vous remercie pour toute la confiance et tous les moyens mis à ma disposition pour mener à bien ce travail. Avec vous j'ai appris l'autonomie sur le terrain d'étude et toutes les approches en monde rural. Il est le guide, le Jack Bauer de la thèse, toujours en train de s'assurer que tout va bien. Didier, trouve ici toute ma reconnaissance.

Je suis très reconnaissance envers Xavier Morvan, the boss et aussi mon jumeau (hihihi puisse qu'on a la même date d'anniversaire), qui a accepté de co-encadrer cette thèse. Avec lui, j'ai appris les mesures des propriétés de rétention en eau du sol, la cartographie, la rigueur scientifique du travail. Il est là toujours en train de me motiver et me relancer pendant les périodes de stress doctoral. J'espère des belles années de collaborations à venir. En dehors de la science, avec ton épouse Aurore et les 3 adorables et infatigables frères Morvan (Erwan, Titouan et Guilhem), vous m'as accueilli et épaulé dans ce travail de thèse. Je n'oublierai jamais ces moments passés ensemble.

Je suis reconnaissant envers Dr. Moussa Malam Abdou, pour le matériel de mesures de conductivité hydraulique à saturation, ces coups de main pour les calculs de conductivité et ses nombreux. Je n'oublie pas non plus Jean Pierre Vandarvaere, Ibrahim Mamadou et Bahari Ibrahim Mahamadou. Je tiens à remercier également Dr Abdourahamane Touré pour son soutien et sa confiance de me m'avoir confié des enseignements au Master MISE à la Faculté des Sciences et Technique de l'UAM.

Je remercie le Professeur Dan Lamso Nomao, Tankari Dan Badjo et Iro Dan Guimba pour leurs précieux conseils. Je n'oublie pas Boubacar Soubeiga, Abdoulaye, Souna, Maidadji, Omar, Issoufou Biro, Saley et David, tantie Hadiza scolarité tous PAT de la faculté d'Agronomie de l'UAM.

Un merci particulier à Alexandra (Alex), ma sœur d'une autre mère et d'un autre continent. Grâce à tes connaissances, ton aide technique dans les analyses des sols, nous étions parvenus à des bons résultats. Avec toi en plus, j'ai découvert ta ville (Reims) et ses meilleurs endroits. Ta famille, Louise, Pierre et Cyril m'ont beaucoup soutenu. Trouvez ici l'expression de ma profonde reconnaissance.

Merci à Marie Ponthieu et Benjamin Cancès d'être dans mon comité d'encadrement et des meilleurs moments passés en famille. Je n'oublie pas ma partenaire et supporteur de football, Louise. Merci également à Maxime et Marine Gommeaux pour tout, je n'oublierai jamais les poulets Bio et le *lemou hari* et les discussions en famille.

Mes collègues de bureau et leurs merveilleuses familles, il s'agit de mon pote Jessy, Stéphanie Essautier et Ivan Calandra. Jessy, tu diras à Béné, Louise et Flori combien je les admire. Merci d'avoir toujours partagé la bonne humeur avec moi. Je n'oublie pas Pauline, Julien, Céline, Patricia, Xavier Drothière.

Je tiens à remercier tous mes camarades doctorants du Niger comme en France pour la motivation mutuelle. Au Niger, il s'agit de Aghali Ingatan Warzagan, Abdoudourahami Mahamadou, Harou Abdou, Salif Bachir, Hassane Saley Abdel Kader, Djibo Elh Saibou, Maigari Assane, Moustapha Galadima, Omar Saley, Issoufou O. Boukari, Abdou Mahamane Rabilou, Harouna Ambouta, Hama Garba Oumou Kaltoum, Abdoulaye Na Allah, Fanna Gado, Illatou Oumar El Farouk. En France, il s'agit de Soizic Gibeaux, Anna Caner-Chabran, Sébastien Laratte, Feifei Cao, Thoma Junique, Abirdu Woreka Nemega, Son Tong Si, Emilie Huby, Justine Padovani, Ilhem, Laure Carole, Cheick. Un merci spécial à Abou Soufianou Sadda pour la collaboration issue de l'amitié naissante et de la complémentarité de nos travaux de thèse. Nos moments passés à Maradi, Bondy et Paris m'ont vraiment marqué.

A Bondy, je remercie Emma Rochelle-Newall directrice adjointe de l'IRD pour l'accueil au sein de l'UMR 242 iEES-Paris. Je remercie chaleureusement Christophe Mahuzier pour les discussions et surtout l'acquisition et le traitement des images Sentinel-2. Je n'oublie pas Laurence Goury, Nasnine, Sandrine, Abdel Aziz, Hanane, Fatima.

Je remercie du fond du cœur aux stagiaires qui ont participé dans les travaux de cette thèse. Il s'agit de Zounon Christian Serge Felix, Sanoussi Mahamane, Ousmane Matto, Zakari Yaou,

Oumar Damien Nagbé Abdoul Karim, Sani Djimraou et Yahaya Koumandaoua Mairoua Aboubacar. Je n'oublierai jamais les moments passés ensemble sur le terrain et de vos sacrifices.

Je tiens à remercier Guillaume Favreau, représentant de l'IRD au Niger pour les conseils. De passage je dis merci aux personnels de son institution à savoir Ibrahim Mainassara, Issa Taweye, Issoufou Alheri, Koné, Abass, Aliko, les tontons Moussa et Djibo, le feu Abdoulaye Oumarou, Tahirou Bana, Tahirou Amadou, Nana Farida, tous agent de l'IRD au Niger pour les appuis multiples.

Je remercie mes amis Mahamadou Djibo, Nassirou Bodo, Aissa Yonli, Almouspha Djibo Boubacar, Issoufou Abdoul Kader, Omar Mamoudou, Laouali toudou, Bakasso, Bachir Yayé, Moussa Himadou et Hamidou, Adamou Alou, Boukari Ado, Nasser Dan Magouli, Roufaye, Inkaye, Will, Soumana, Zeinabou Abdou, pour les appuis multiples dans le cadre de ce travail.

A Sadoré, je n'oublie pas Ismael Issaka Nomao, Lobbo, le vieux Djibril et ses enfants. A Banizoumbou, je tiens à remercier Hama Koma pour son appui multiforme. A Arraourayé, Ibrahim pour être le guide et souvent même agent de collecte de donnée. A Tarna, il est impossible d'oublier le vieux Yaou et sa famille. Merci beaucoup Baba Yaou pour tout ce que vous m'avez appris sur le terrain du Goulbi.

Aux familles Abdou Djiribani, Baba kaina, Adamou Marourikoye et Yonli pour leur soutien inestimable.

Je tiens aussi à remercier fraternellement la promotion des AGRO 4, cobaye du système LMD au Niger.

Je suis reconnaissant envers toute ma famille qui a su me supporter et m'encourager sans relâche. Trouvez ici toute ma reconnaissance.

Enfin le dernier mot revient à mon épouse Hadjara et mon fils Kaocen qui ont énormément soufferts de mes absences. Cette absence a toujours fortifié mon amour pour vous. Trouvez ici toute ma reconnaissance.

RESUME

L'hétérogénéité est une caractéristique majeure de la surface du sol dans la zone sahélienne. Ce travail a été réalisé dans deux régions sahéliennes du Niger (Tillabéri et Maradi) présentant des conditions agro-écologiques, pédoclimatiques et socio-économiques différentes vis-à-vis de la culture du niébé. Son objectif est de comprendre l'influence de l'hétérogénéité spatiale et fonctionnelle de la surface du sol sur la production du niébé.

Notre approche méthodologique s'appuie sur des enquêtes semi-directives auprès des producteurs de niébé, la cartographie et la caractérisation de propriétés physico-chimiques des entités homogènes de surface (EHS), ainsi que le suivi des propriétés hydrodynamiques et des paramètres de rendements de niébé au cours de deux saisons culturales.

Les données collectées ont permis de rassembler les connaissances locales sur l'hétérogénéité de la surface du sol, la hiérarchisation des EHS selon leurs potentiels productifs et leurs niveaux de fertilité. Les formes d'hétérogénéité de surface identifiées dans le cadre de cette étude sont celles liées aux modifications des états de surface, notamment la formation des croûtes de surface, les changements dans la microtopographie et le couvert végétal. Elles regroupent les EHS liées aux croûtes d'érosion (ERO), aux croûtes de décantation (DEC), aux croûtes de dépôts éoliens autour de Guiera senegalensis (EOL-GS), aux croûtes structurales associées au houppier de Faidherbia albida (ST-FA), aux croûtes structurales associées aux fourmilières (ST-F), aux croûtes structurales (ST-SN), aux croûtes de décantation sur alluvion (DEC-AL), aux croûtes de décantation sur alluvion associées au houppier de Faidherbia albida (DEC-AL-FA). La nature et l'occupation spatiale de ces EHS au sein des parcelles varient selon la région et la nature des sols. Les EHS les plus représentées sont liées aux croûtes structurales sur les sols ferrugineux tropicaux dans la région de Tillabéri et aux croûtes de décantation sur les sols alluviaux dans la région de Maradi. Les valeurs les plus élevées en carbone, azote, phosphore, bases échangeables et capacité d'échanges cationique ont été mesurées sur les entités homogènes de surface de types DEC sur sols ferrugineux tropicaux et DEC-AL-FA sur sols alluviaux. Les valeurs les plus faibles ont été obtenues sur les EHS ST-SN et ERO. Les valeurs de capacités de rétention en eau et de réserve en eau utile les plus élevées ont été enregistrées sur les EHS DEC. Les plus fortes

valeurs de conductivité hydraulique à saturation (Ks) ont été mesurées sur les EHS EOL-GS (64,4 $mm.h^{-1}$) et les plus faibles sur les EHS DEC (2,7 $mm.h^{-1}$) et ERO (5,3 $mm.h^{-1}$). Ces valeurs décroissent en fonction du cumul de pluie reçu après sarclage et selon les dynamiques d'évolution des croûtes à la surface des différentes EHS au cours de 2 saisons culturales. La nodulation et les rendements en fanes et en grains des variétés de niébé sont plus importants sur ST-FA sur les sites de Tillabéri et sur ST-F sur les sites de Maradi. Les EHS ERO et ST-SN ont été identifiées comme étant des entités à contraintes, c'est-à-dire des entités avec le taux de nodulations et des rendements en fanes et en grains les plus faibles. L'application de la fumure organique sur ces surfaces à contraintes se traduit par l'amélioration de leurs propriétés physico-chimiques et hydriques, doublée d'une hausse significative de la nodulation et des rendements en fanes et en grains. Les rendements en fanes et en grains obtenus sur les entités à contraintes fumées sont supérieurs à ceux des entités non fumées. Ils dépassent largement ceux obtenus en milieu paysan au Niger qui varient entre 120 et 400 kg/ha selon les variétés.

Les résultats de cette étude pourront permettre une meilleure prise en compte de l'hétérogénéité de surface du sol dans la recherche des solutions pour optimiser la production du niébé sur les sols sahéliens avec de fortes hétérogénéités de surface.

Mots clés : Hétérogénéité de surface du sol, entité homogène de surface du sol, nodulation, rendement, niébé, propriétés hydriques des sols, Niger

Spatial and functional heterogeneity of soil surface and its influence on cowpea production on family farms in Niger

Abstract

Heterogeneity is a major feature of soil surface in the Sahelian zone. This work was carried out in two Sahelian regions of Niger (Tillaberi and Maradi) with different agroecological, pedoclimatic and socio-economic conditions related to cowpea cultivation. It aimed to understand the influence of spatial and functional heterogeneity of soil surface on cowpea production.

Our methodological approach is based on semi-directive surveys conducted on cowpea producers, mapping and characterization of physicochemical properties of homogeneous soil surface, as well as field monitoring of hydrodynamic properties and cowpea yield parameters during two growing seasons. The collected data allowed gathering local knowledge on soil surface heterogeneity and ranking of homogeneous surface according to their productive potential and their fertility levels. The types of homogeneous surface identified in this study are those related to surface features changes, including crusting, changes in microtopography, and vegetation cover. They comprised the homogeneous surface features related to erosion crusts (ERO), deposition crusts (DEC), wind erosion crusts around Guiera senegalensis (EOL-GS), structural crusts under the crown of Faidherbia albida (ST-FA), structural crusts associated with anthills (ST-F), structural crusts (ST-SN), deposition crusts on alluvial soils (DEC-AL) and deposition crusts on alluvial soils under the crown of Faidherbia albida (DEC- AL-FA). The nature and spatial arrangement of these homogeneous soil surfaces within plots vary by region and soil type. The most representative homogeneous soil surfaces are related to structural crusts on tropical ferruginous soils in Tillabéri and alluvial deposition crusts on alluvial soils in Maradi. The greatest values for carbon, nitrogen, phosphorus, exchangeable bases and cation exchange capacity were measured on DEC on tropical ferruginous soils and DEC-AL-FA on alluvial soils. The lowest values were obtained on ST-SN and ERO. The greatest values of soil water retention capacity and useful water reserve were recorded on DEC. The greatest values of saturation hydraulic conductivity (Ks) were measured on the EOL-GS (64.4 $mm.h^{-1}$) and the lowest on DEC (2.7 $mm.h^{-1}$) and ERO (5.3 $mm.h^{-1}$). These values decreased during both cropping seasons following the cumulative rainfall received after tillage and according to the dynamics of

crusts evolution on the different homogeneous surface. The nodulation and residues and grains yields of cowpea varieties are higher on ST-FA at sites of Tillaberi and at ST-F at sites of Maradi. The ERO and ST-SN were identified as a types of homogeneous soil surface with constraints, i.e. with the lowest nodules number and residues and grains yields. Organic manure application on these surfaces resulted in the improvement of their physico-chemical and water properties, and also a significant increase in nodulation and residues and grains yields. The resulting yield exceed those obtained in a peasant environment in Niger which varies between 120 and 400 kg/ha depending on the variety.

The results of this study may help in integrating soil surface heterogeneity to optimize cowpea production on Sahelian soils.

Keywords: Heterogeneity of soil surface, homogeneous entity of soil surface, nodulation, yield, cowpea, properties of soils, Niger

TABLE DES MATIERES

Avant-propos ii

Dédicace iii

Remerciements iv

Résumé viii

Introduction générale et problématique 1

Chapitre 1 : Quelques notions sur l'hétérogénéité de la surface du sol 7

1.1. Les facteurs de l'hétérogénéité de la surface du sol 8

1.3. Conclusion partielle 26

Chapitre 2 : Monographie du niébé 28

2.1. Classification, origine et aire de répartition 28

2.2. La plante et son cycle biologique 28

2.3. Exigence agro-climatiques 30

2.4. Intérêts de la culture du Niébé en zone sahélienne 30

2.5. Conclusion partielle 36

Chapitre 3 : Présentation des sites et cadre de l'étude 37

3.1. Situation géographique 37

3.2. Conditions climatiques 38

3.3. Géologie, géomorphologie et pédologie 41

3.4. Végétation 48

3.5. Démographie 50

Chapitre 4 : Typologie des entités homogènes de surface du sol, connaissance locale de la fertilité et de l'hétérogénéité de surface du sol 52

4.1. Introduction 52

4.2. Matériel et méthodes 53

4.3. Résultats 56

4.4. Discussion 80

4.5. Conclusion partielle 83

Chapitre 5:Cartographie et caractérisation de l'hétérogénéité de surface du sol 84

5.1. Introduction 84

5.2. Matériel et méthodes 85

5.3. Résultats 96

5.4. Discussion partielle 125

5.5. Conclusion 127

Chapitre 6 : Dynamique temporelle des états de surface et des propriétés hydrodynamiques en lien avec l'hétérogénéité de surface du sol 129

6.1. Introduction 129

6.2. Matériel et méthodes 130

6.3. Résultats 140

6.4. Discussion partielle 158

6.5. Conclusion partielle 160

Chapitre 7 : Effet de l'hétérogénéité de surface du sol sur la nodulation et la production du niébé 162

7.1. Introduction 162

7.2. Matériel et méthodes 162

7.3. Résultats 168

7.4. Discussion 197

7.5. Conclusion 199

Chapitre 8. Effets de l'application du fumier sur la qualité du sol et le potentiel de production du niébé sur les EHS à contraintes 200

8.1. Introduction 200

8.2. Matériel et méthodes 201

8.3. Résultats 204

8.4. Discussion 225

8.5. Conclusion 227

Chapitre 9 : Discussion générale 228

9.1. Introduction 228

9.2. L'hétérogénéité de surface, une notion connue des producteurs de niébé au Niger .. 229

9.3. L'hétérogénéité de surface du sol, une caractéristique commune aux agrosystèmes sahéliens 233

9.4. L'hétérogénéité de surface du sol, une caractéristique variable dans le temps 235

9.5. Variabilité des propriétés hydriques des sols au sein des entités homogènes de surface (ESH) 236

9.6. Influence de l'hétérogénéité de surface du sol sur la nodulation et la production du niébé 239

9.7. L'apport du fumier une solution pour améliorer la production du niébé sur les entités homogènes de surface à contraintes 244

Conclusion générale et perspectives 246
Bibliographie 250
Annexes 291
Annexe 1 292
Annexe 2 299
Annexe 3 315

Liste des figures

Figure 1: a) image aérienne illustrant l'hétérogénéité de surface du sol, (b) vue de la surface d'un champ dans le terroir de Sadoré, région de Tillabéri au Niger. Noter l'influence de l'hétérogénéité de surface du sol sur la croissance du niébé. 5
Figure 2: Clef de détermination des croûtes physiques (Casenave et Valentin, 1989) 12
Figure 3 : photo d'une croûte structurale (Casenave et Valentin, 1989) 14
Figure 4 Photo d'une croûte de decantation 14
Figure 5: Photo d'une croûte de ruissellement (Casenave et Valentin, 1989) 15
Figure 6: Photo d'une croûte de dépôt éolien 16
Figure 7: Photo d'une croûte de dessication (Casenave et Valentin, 1989) 16
Figure 8:Photo d'une croûte de d'érosion (Casenave et Valentin, 1989) 17
Figure 9: Photo d'une croûte microbiotique (Seyni Bodo, 2013) 18
Figure 10: Quatre principales catégories de bio-construction des termites reconnues par les agricultures au Benin. (a) Grande termitière ; (b) petite termitière ; (c) termitières développées sur des débris végétaux ; (d) termitières fongiformes (Loko et al., 201 21
Figure 11: Arbre agroforestier dans un champ (a) et arbuste ayant fait de RNA au Niger 24
Figure 12: Photo d'un pied de niébé cultivé à Tarna, région de Maradi 28
Figure 13: Greniers de stockage en banco du niébé (a) gousses et (b) grains 29
Figure 14: nodules formés dans les racines de niébé. 32
Figure 15: Evolution de la production et de la superficie emblavée en niébé au Niger entre 1990 et 2009 34
Figure 16: Evolution de la production et de la superficie emblavée en niébé dans les régions de Maradi et de Tillabéri entre 1990 et 2009 35
Figure 17: Carte de localisation des sites d'étude 37
Figure 18: Carte des précipitations moyennes annuelles en Afrique de l'ouest (période 1951-1989), d'après L'Hôte et Mahe (1996). Les zones d'étude (étoiles) sont situées dans la bande sahélienne (entre les isohyètes 200 et 700 mm). 38
Figure 19: Carte illustrant les isohyètes entre les sites d'étude 39
Figure 20: Évolution de la moyenne des cumuls annuels des pluies glissante et de l'indice de pluie standardisé (IPS) de la station de : (a) Niamey sur la période 1962-2014. Pmoy *(1960-2017) = 562 mm et σ = 130 mm.* ; (b) Maradi sur la période de 1960 et 2014. Pmoy *(1960-2017) = 490 mm et σ = 110 mm.* L'indice IPS est calculé selon la formule IPS = (Pi – Pmoy)/σ avec i indice de l'année. Données de la Direction de la météorologie Nationale du Niger 40
Figure 21: Formations géologiques des zones d'étude (Modifié d'après Greigert & Pougnet, 1967, UNICEF) 43
Figure 22: carte des sols des sites d'études 44
Figure 23: Évolution de la population des départements de Kollo, Madarounfa et Mayahi entre 1988 et 2012 51
Figure 24: Situation géographique des communes étudiées 53
Figure 25: Prospection des champs avec les paysans 55
Figure 26: Séance d'enquête dans les champs chez les producteurs 55
Figure 27: Entités de surface à croûte d'érosion (ERO) sur le site de Banizoumbou 56

Figure 28: Entité de surface à croûtes de décantation (DEC) sur le site de Banizoumbou (commune de Dantiandou, région de Tillabéri) 57
Figure 29: Entité de surface à croûtes de dépôts éoliens (EOL-GS) sur le site de Arraourayé 57
Figure 30: Entité de surface à croûtes structurales associées au houppier de Faidherbia albida (ST-FA) 58
Figure 31: Entité de surface à croûtes structurales associées aux fourmilières (ST-F) 59
Figure 32: Entité de surface à croûtes de décantation sur alluvions (DEC-AL) sur le site de Tarna..... 59
Figure 33: Entité à croûte de décantation sur alluvions sous le houppier de Faidherbia albida (DEC-AL-FA) 60
Figure 34: Photographies d'une croûte de décantation. (a) sur sols ferrugineux tropicaux à Banizoumbou (Région de Tillabéri), (b) sur sol alluvial du Goulbi de Maradi 61
Figure 35: Entité de surfaces normales ou surfaces de référence à croûtes structurales après sarclage (ST-SN), photo prise après une pluie 61
Figure 36: Répartition des enquêtés selon leurs classe d'âge 64
Figure 37: Répartition des enquêtés en fonction du critère de scolarisation. 65
Figure 38: Mode d'acquisition des terres cultivé en niébé sur les sites d'étude 65
Figure 39: Superficie moyenne par ménage des champs cultivés en niébé sur l'ensemble des sites .. 66
Figure 40: Analyse en composantes principales des connaissances locales des facteurs responsables de l'hétérogénéité de surface du sol sur les sites 75
Figure 41: Analyse en composante principales des connaissances locales des contraintes édaphiques pour la production du niébé..... 78
Figure 42: (a) Stockage des résidus de cultures de mil et du niébé sur *Ziziphis mauritiana*, (b) exportation des résidus de cultures du mil par les enfants vers la maison sur le site de Sadoré (campagne agricole 2015) 86
Figure 43: Réalisation des prises de vue d'image aérienne avec le drone. a) Drone au moment du lancement ; b) Drone à l'atterrissage, c) Photo d'une prise par le drone à Arrouarayé le 25 Août 2015 89
Figure 44: Distribution des points d'échantillonnage des sols. (A) au niveau des entités de type ST-FA, (B) au niveau des entités de type ST-F et EOL-GS, (C) au niveau des entités de formes rectangulaires 91
Figure 45: Vue du four de calcination. A noter les échantillons placés dans les creusets et posés à l'intérieur et à l'extérieur du four de calcination. 93
Figure 46: Illustration de la procédure de mesure de la densité apparente. a) vue de la surface du sol et des cylindres de prélèvement. b) séchage des échantillons à 105 °C. c) mesure de la masse des échantillons. 95
Figure 47: cartographie de l'hétérogénéité de surface du sol sur le site de Banizoumbou 98
Figure 48: Cartographie de l'hétérogénéité de surface du sol sur le site de Sadoré 99
Figure 49 : cartographie de l'hétérogénéité de surface du sol sur le site de Arraourayé..... 100
Figure 50: cartographie de l'hétérogénéité de surface du sol sur le site de Tarna 101
Figure 51: cartographie de l'hétérogénéité de surface du sol sur le site de Tarna 102
Figure 52: classe de texture des entités de surface du sol sur le site de Banizoumbou 106
Figure 53: Analyse en composante principale entre les entités homogènes de surface du site de Banizoumbou et leurs caractéristiques physico-chimiques 109
Figure 54: classe de texture des entités de surface du sol sur le site de Sadoré 111

Figure 55: Analyse en composante principale entre l'azote, phosphore, carbone, bases échangeables, capacité d'échange cationique, le pH eau, la granulométrie et la densité apparente et les entités homogènes de surface sur le site de Sadoré..... 113
Figure 56: classe de texture des entités de surface du sol sur le site de Arraourayé..... 115
Figure 57: Analyse en composante principale entre l'azote, phosphore, carbone, bases échangeables, capacité d'échange cationique, le pH eau, la granulométrie et la densité apparente et les entités homogènes de surface sur le site de Arraourayé..... 117
Figure 58: classe de texture en fonction des entités de surface du sol sur le site de Tarna..... 119
Figure 59: Analyse en composante principale entre l'azote, phosphore, carbone, bases échangeables, capacité d'échange cationique, le pH eau, la granulométrie et la densité apparente et les entités homogènes de surface sur les deux types de sol du site de Tarna..... 122
Figure 60: Cumul pluviométrique sur les sites pendant les saisons culturales 2015 et 2016..... 130
Figure 61: Dispositif permettant le relevé des états de surface. Le cadre métallique mesure 1m x 1m. La mesure est effectuée dans une EHS de type DEC. Noter les structures desquamées caractéristiques des croûtes de décantation..... 131
Figure 62: Principe de révélé des EDS sur les EHS circulaire de type EOL-GS et ST-F..... 132
Figure 63: Dispositif de mesure de rétention en eau du sol au laboratoire..... 136
Figure 64: Dispositif de mesure de la conductivité hydraulique *in situ* (tensio-infiltrométrie)..... 138
Figure 65: Schéma du dispositif de mesures temporelles de la conductivité hydraulique. Les ronds blancs représentent l'emplacement des cylindres..... 139
Figure 66: Vue du dispositif de mesures sur le terrain. 1. mise en place du cylindre. Le cylindre est enfoncé à la main en exerçant une pression au moyen d'une plaque métallique légère 2. Vue du cylindre mis en place. 3. Vue d'ensemble du tensio-infiltromètre. 4. Opération de mesures de conductivité hydraulique à saturation en cours..... 140
Figure 67: Evolution des EDS en fonction des EHS des stades phénologiques à Banizoumbou : (a) Levée ; (b) Ramification ; (c) Floraison ; (d) Maturité..... 141
Figure 68:Image aérienne prise le 21 Août 2015 montrant l'hétérogénéité de la croissance des cultures durant la phase de ramification dans un champ de Banizoumbou..... 143
Figure 69: Dynamique temporelle du NDVI au cours de la saison culturale 2016..... 144
Figure 70: Dynamique temporelle du NDVI sur le champ 2 au cours de la saison culturale 2016..... 145
Figure 71: Dynamique temporelle du NDVI sur le champ 3 au cours de la saison culturale 2016..... 146
Figure 72: Variation temporelle du NDVI sur le site de Banizoumbou durant la saison culturale 2016 147
Figure 73: Teneurs en eau à la capacité au champ (pF2) et au point de flétrissement permanent (pF4.2) mesurées sur les EHS du site de Banizoumbou. a. Durant la saison culturale 2015. b : Durant la saison culturale 2016. 148
Figure 74: Réserve en eau utile en fonction des entités homogènes de surface du sol 2015 et 2016 confondus..... 149
Figure 75: Caractérisation et suivi temporel du NDWI sur le champ 1 durant la saison culturale 2016 150
Figure 76: Dynamique temporelle du NDWI sur le champ 2 au cours de la saison culturale 2016.... 151
Figure 77: Dynamique temporelle du NDWI sur le champ 3 au cours de la saison culturale 2016.... 152
Figure 78: Variation temporelle du NDWI sur le site de Banizoumbou..... 153

Figure 79: Conductivité hydraulique à saturation (Ks) en fonction des entités homogènes de surface du sol en 154
Figure 80: Evolution temporelle de la conductivité hydraulique après sarclage en fonction des EHS. a : 2015 et b : 2016..... 155
Figure 81: analyse en composante principale des EHS et des paramètres du sol : densité apparente (Da), capacité de rétention en eau à la capacité au champ (wpF2) et au point de flétrissement permanent (wpF4.2), carbone (C), réserve en eau utile (RU), conductivité hydraulique à saturation (Ks), recouvrement végétal (V), proportion des croûtes d'érosion (C.ERO), structurale (ST), microbiotiques (BSC), de ruissellement (RUI), de décantation (C.DEC) et de la litière (Lit) 156
Figure 82: schéma du dispositif sur les sites de Banizoumbou et Sadoré..... 163
Figure 83: Variétés de niébé suivies sur les 4 sites étudiés 165
Figure 84: Attaque du niébé par les ennemies de culture 169
Figure 85: Rendement en fanes des variétés de niébé DK et KVX 61-1 en fonction des EHS en 2015 et 2016 à Banizoumbou..... 173
Figure 86: Levée du niébé. (a) Sur une entité de type ST-SN, (b) Sur une entité de type ERO..... 174
Figure 87 : Rendement en grains des variétés de niébé DK et KVX 61-1 en fonction des EHS en 2015 et 2016 à Banizoumbou..... 175
Figure 88 : Rendement en fanes des variétés de niébé LS et KVX 61-1 en fonction des EHS en 2015 et 2016 à Sadoré. *Les histogrammes ayant la même lettre en commun pour chaque variété de niébé pour chaque année culturale ne sont pas significativement différents au seuil de p = 0.05* 178
Figure 89 : Rendement en grains des variétés de niébé LS et KVX 61-1 en 2015 et 2016 à Sadoré. *Les histogrammes marqués par la même lettre pour une même variété de niébé et une même année culturale ne sont pas significativement différents au seuil de p = 0.05.* 180
Figure 90 : Rendement en fanes des variétés de niébé Dan Zahi et KVX 61-1 en fonction des EHS en 2015 et 2016 à Arraourayé. *Les histogrammes ayant la même lettre en commun pour chaque variété de niébé pour chaque année culturale ne sont pas significativement différents au seuil de p = 0.05* 183
Figure 91 : Rendement en grains des variétés de niébé Dan Zahi et KVX 61-1 en 2015 et 2016 à Arraourayé. *Les histogrammes ayant en commun la même lettre pour une même variété de niébé et au cours d'une même année culturale ne sont pas significativement différents au seuil de p = 0.05.* 184
Figure 92 : Rendement en fanes des variétés de niébé Dan Zahi et KVX 61-1 en fonction des EHS en 2015 et 2016 à Tarna. *Les histogrammes ayant en commun la même lettre pour une même variété de niébé et pour la même année culturale ne sont pas significativement différents au seuil de p = 0.05* 188
Figure 93 : Vue d'une parcelle expérimentale installée sur une EHS de type ST-F sur le site de Tarna (Région de Maradi). A noter la couverture de la surface du sol par la variété locale Bartha cultivée en association avec le mil..... 189
Figure 94 : Rendement en grains des variétés de niébé Dan Zahi et KVX 61-1 en fonction des EHS en 2015 et 2016 à Tarna *Les histogrammes ayant en commun la même lettre pour une même variété de niébé et une même année culturale ne sont pas significativement différents au seuil de p = 0.05.*... 191
Figure 95 : Forte croissance des mauvaises herbes sur DEC-AL-FA 191
Figure 96: Comparaison des rendements en fanes des variétés de niébé en fonction des EHS des sites (a) en 2015 et (b) en 2016 193
Figure 97: Comparaison des rendements en fanes des variétés de niébé en fonction des EHS et des sites (a) en 2015 et (b) en 2016..... 194

Figure 98: Comparaison des rendements en grains des variétés de niébé en fonction des sites et des EHS. (a) Durant l'année culturale 2015. (b) Durant l'année culturale en 2016. 196
Figure 99: Dispositif de suivi de la production et de la nodulation des variétés de niébé KVX61-1 et VL sur les parcelles fumées durant la saison culturale 2016. 202
Figure 100: effet de la fumure organique sur la rétention en eau 208
Figure 101: Effet de la fumure organique sur la réserve en eau utile..... 209
Figure 102: Effet de la fumure organique sur la conductivité hydraulique à saturation des EHS à contrainte fumée et non fumée. 210
Figure 103: Rendement en fanes des variétés DK et KVX 61.1 sur les entités ERO et ST-SN avec ou sans apport de fumier du site de Banizoumbou 215
Figure 104: Rendement en grains de DK et KVX 61.1 en fonction des entités d'apport de fumier et les EHS à Banizoumbou*Les histogrammes présentant la même lettre pour chaque entité fumée et non fumée ligne ne sont pas significativement différents au seuil de p = 0.05 pour une même entité fumée ou non*..... 216
Figure 105: Effet du fumier sur le rendement en fanes de LS et KVX 61.1 des entités d'apport de fumier et les EHS Sadoré 218
Figure 106: Croissance du niébé en association avec le mil en début de ramification en association avec le mil sur ERO et ERO + Fumier 218
Figure 107: Rendement en grains des variétés LS et KVX 61.1 cultivées sur les entités ST et ERO avec apport ou sans apport de fumier à Sadoré. *Les histogrammes présentant la même lettre pour chaque entité fumée et non fumée ne sont pas significativement différents au seuil de p = 0.05.*..... 219
Figure 108: Rendement en fanes des variétés Dan Zahi et KVX 61.1 cultivées sur des EHS avec et sans apport de fumier à Arraourayé. *Les histogrammes présentant la même lettre et se rapportant à une même entité fumée et non fumée ne sont pas significativement différents au seuil de p = 0.05.*..... 221
Figure 109: Rendement en grains des variétés Dan Zahi et KVX 61.1 sur les entités de surface avec apport et sans apport de fumier sur le site de Arraourayé. *Les histogrammes présentant la même lettre et se rapportant à la même entité fumée et non fumée ne sont pas significativement différents au seuil de p = 0.05.*..... 222
Figure 110: Rendement en fanes des variétés Bartha et KVX 61.1 sur les entités de surface avec apport et sans apport de fumier sur le site de Tarna. *Les histogrammes présentant la même lettre et se rapportant à une même entité fumée et non fumée ne sont pas significativement différents au seuil de p = 0.05.* 224
Figure 111: Rendement en grains des variétés Bartha et KVX 61.1 sur les entités de surface avec apport et sans apport de fumier sur le site de Tarna. *Les histogrammes présentant la même lettre et se rapportant à la même entité fumée et non fumée ne sont pas significativement différents au seuil de p = 0.05.* 225

Liste des tableaux

Tableau 1: Classement des principaux pays producteurs du niébé en 2007. (PRODEX, 2010) 34
Tableau 2: Evolution de la population des régions de Maradi et Tillabéri entre 1960 et 2012..... 50
Tableau 3: Répartition des entités homogènes de surface du sol en fonction des sites d'études..... 63
Tableau 4: Perception de l'évolution de la fertilité des sols sous culture de niébé sur l'ensemble des sites 67
Tableau 5: Indicateurs selon la perception des paysans de fertilité des sols sous culture de niébé.... 69
Tableau 6: Indicateurs paysans d'infertilité des sols sous culture de niébé 70
Tableau 7: Bio-indicateur végétale de fertilité des sols cités sur l'ensemble des sites 71
Tableau 8: Bio indicateurs végétaux d'infertilité des sols cités sur l'ensemble des sites 72
Tableau 9: Facteurs responsables de l'hétérogénéité de surface du sol 74
Tableau 10: 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 de fertilité 76
Tableau 11: Proportion des contraintes édaphiques en fonction des sites selon les producteurs..... 77
Tableau 12: Valeurs des contributions et des cosinus² des connaissances locales 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 78
Tableau 13: Gestion des contraintes édaphiques liées à la production du niébé 79
Tableau 14: Nombre d'échantillons collectés durant la saison de culture 2015 90
Tableau 15: Nombre d'échantillons collecté durant la saison culture 2016..... 90
Tableau 16: Superficie et proportions des champs cultivés occupées par les entités homogènes de surface du sol sur le site de Banizoumbou..... 103
Tableau 17: Superficie et proportions de superficie des champs cultivés occupées par les entités homogènes de surface du sol sur le site de Tarna 104
Tableau 18: Granulométrie et densité apparente des sols des EHS sur le site de Banizoumbou..... 106
Tableau 19: Teneurs en C, N, P et bases échangeables des EHS sur le site de Banizoumbou 108
Tableau 20: Valeurs des contributions et des cosinus² des entités homogènes de surface du sol et les paramètres des sols sur le site Banizoumbou. Les valeurs en gras des variables et des facteurs sont celles utilisées pour l'interprétation avec les axes canoniques 109
Tableau 21: Granulométrie et densité apparente des sols des entités de surface du sol sur le site de Sadoré..... 110
Tableau 22: Caractéristiques physico-chimiques des EHS sur le site de Sadoré..... 112
Tableau 23: Valeurs des contributions et des cosinus² des entités homogènes de surface du sol et les paramètres des sols sur le site de Sadoré. Les valeurs en gras des variables et des facteurs sont celles utilisées pour l'interprétation avec les axes canoniques 113
Tableau 24: Caractérisation granulométrique des sols des différentes sur le site de Arraourayé..... 114
Tableau 25: Caractéristiques physico-chimiques des EHS sur le site de Arraourayé..... 116
Tableau 26: Caractéristiques physico-chimiques des EHS sur le site de Arraourayé. Les valeurs en gras des variables et des facteurs sont celles utilisées pour l'interprétation avec les axes canoniques.... 118
Tableau 27: Caractérisation granulométrique des sols des différentes sur le site de Tarna..... 119
Tableau 28: Caractéristiques physico-chimiques des EHS sur le site de Tarna..... 121

Tableau 29: Valeurs des contributions et des cosinus² des entités homogènes de surface du sol et les paramètres des sols sur les deux types de sol du site de Tarna. Les valeurs en gras des variables et des facteurs sont celles utilisées pour l'interprétation avec les axes canoniques 123
Tableau 30: Indice de risque de dégradation physique des sols des entités d'hétérogénéités de surface des sites d'étude 124
Tableau 31: Caractéristiques des images Optique Sentinel-2A utilisées 133
Tableau 32: Tableau des normes de pF utilisées pour déterminer le potentiel matriciel à la capacité au champ en fonction de la teneur en argile (d'après Bonneau 1961) 134
Tableau 33 : Valeurs des contributions et des cosinus² entre les EHS et les paramètres du sol : de densité apparente, capacité de rétention en eau à la capacité au champ et au point de flétrissement permanent, carbone, réserve en utile, conductivité hydraulique à saturation, recouvrement végétal, proportion des croûte d'érosion, structurale, microbiotiques, de ruissellement, de décantation et de la litière 157
Tableau 34: Dénombrement et surface des parcelles expérimentales dans les quatre sites d'étude 163
Tableau 35: Caractéristiques des variétés améliorées et locales de niébé utilisées 166
Tableau 36: Calendrier culturale en fonction des sites 167
Tableau 37: Attaque sur le niébé au courant des saisons culturales 2015 et 2016 168
Tableau 38: Résultats du test de comparaisons multiples des moyennes du nombre de nodules totaux et fonctionnels formés par plant sur les variétés DK et KVX 61-1 en fonction des EHS à Banizoumbou en 2015 et 2016 171
Tableau 39: Analyse de variance entre 2015 et 2016 de la formation des nodules des variétés de niébé en fonction des EHS sur le site de Banizoumbou 172
Tableau 40: Analyse de variance entre le rendement en fanes des variétés de niébé au cours des années culturales 2015 et 2016 174
Tableau 41 : analyse de variance du rendement en fanes des variétés de niébé en fonction des EHS sur le site de Banizoumbou entre 2015 et 2016 175
Tableau 42 : Nombre de nodules totaux et fonctionnels formés par plant des variétés LS et KVX 61-1 en fonction des EHS à Sadoré en 2015 et 2016 176
Tableau 43 : Analyse de variance de la formation des nodules des variétés de niébé en fonction des EHS sur le site de Sadoré entre 2015 et 2016 177
Tableau 44 : analyse de variance du rendement en fanes des variétés de niébé en fonction des EHS sur le site de Sadoré entre 2015 et 2016 179
Tableau 45 : Analyse de variance entre les rendements en grains des variétés de niébé en 2015 et 2016 sur le site de Sadoré. 180
Tableau 46 : Nombre de nodules totaux et fonctionnels formés par plant sur les variétés DK et KVX 61-1 à Arraourayé en 2015 et 2016 181
Tableau 47 : Analyse de variance entre 2015 et 2016 de la formation des nodules des variétés de niébé sur le site de Arraourayé 182
Tableau 48 : Analyse de variance entre les rendements en grains des variétés de niébé en 2015 et 2016 sur le site de Arraourayé 185
Tableau 49 : Nombre de nodules totaux et fonctionnels formés par plant des variétés DK et KVX 61-1 en fonction des EHS à Tarna en 2015 et 2016. 186
Tableau 50 : Analyse de variance entre les nombres de nodules formés par les variétés de niébé en 2015 et 2016 en fonction des EHS sur le site de Tarna. 187

Tableau 51 : Analyse de variance entre les rendements en fanes des variétés Bartha et KVX 61-1 au cours de la saison culturale 2015 et 2016 sur le site de Tarna. 189
Tableau 52: Analyse de variance entre les rendements en grains des variétés de niébé de 2015 et 2016 sur le site de Tarna. 192
Tableau 53: Quantité de fumier apportée par EHS à contrainte sur l'ensemble des sites 201
Tableau 54: Nombre d'échantillons collecté durant la saison de culture 2016 203
Tableau 55: répartition des échantillons des sols pour la rétention en eau 204
Tableau 56: Composition granulométrique des entités de surface du sol fumées et non fuméées des sites de Banizoumbou et Sadoré. 205
Tableau 57: Propriétés chimiques des entités de surface du sol à contrainte ayant reçu ou non de la fumure organique sur les sites de Banizoumbou et Sadoré. 207
Tableau 58: Analyse de variance entre la réserve en eau utile des EHS à contraintes fumées et non fumées. 209
Tableau 59: Analyse de variance de la conductivité hydraulique entre EHS à contrainte fumée et non fumée 210
Tableau 60: Composition granulométrique des entités de surface du sol à contrainte ayant ou pas reçues d'apport organique sur les sites de Arraourayé et Tarna (Maradi) 211
Tableau 61: Effet de la fumure organique sur les propriétés chimiques des entités de surface du sol à contrainte et les entités sans contraintes sur les sites de Arraourayé et Tarna 213
Tableau 62: Résultat du test de comparaisons multiples des moyennes des nodules de niébé formés par variété sur les EHS à contraintes avec et sans fumier à Banizoumbou. 214
Tableau 63: Nombres de nodules totaux et fonctionnels mesurés sur les variétés LS et KVX 61.1 cultivées sur les parcelles fumées et non fumées à Sadoré. 217
Tableau 64: Nombres de nodules totaux et fonctionnels mesurés sur les variétés Dan Zahi et KVX 61.1 cultivées sur les parcelles fumées et non fumées à Arraourayé 220
Tableau 65: Nombres de nodules totaux et fonctionnels mesurés sur les variétés Bartha et KVX 61.1 cultivées sur les parcelles fumées et non fumées à Tarna. 223

INTRODUCTION GENERALE ET PROBLEMATIQUE

Le sahel connait depuis la fin des années 1960 des changements sociétaux et environnementaux liés à l'accroissement de la population, aux changements climatiques et à la dégradation accélérée des ressources naturelles (Le Barbé et al., 2002 ; Lebel et Ali, 2009). Ces changements soulèvent de nombreuses questions, notamment celle de la capacité des agrosystèmes sahéliens à nourrir durablement une population en plein essor (Nation Unies, 2015; Pierre et al., 2018). La population sahélienne, a en effet augmenté en moyenne de 273 % entre 1960 et 1997 (Ozer, 2000) et la pression engendrée sur les ressources ligneuses a connu une augmentation du même ordre de grandeur (FAO, 1998). On assiste à la saturation de l'espace exploitable à travers l'extension des surfaces agricoles et pastorales de manière à augmenter la capacité de production d'une agriculture essentiellement familiale et pluviale (culture pendant la saison des pluies), sans toutefois atteindre l'autosuffisance alimentaire. En l'espace d'un demi-siècle la proportion des surfaces cultivées est passées de 12 à 72 % des sols cultivables en zone sahélienne de l'ouest du Niger (Loireau *et al.,* 2000). Cette extension des surfaces cultivées s'est faite au détriment du couvert végétal et des systèmes de jachère, une pratique utilisée pour régénérer la fertilité des sols entre deux périodes de culture, modifiée en raccourcissant sa durée voire même en la supprimant (Hiernaux et Houérou, 2006). En définitive, la conversion de savanes en terres de culture, le raccourcissement de la durée de jachère ou son abandon et la surexploitation des ressources ligneuses ont conduit à la diminution de la couverture végétale et à la dénudation totale de vastes surfaces de sol en zone sahélienne (Abdourhamane Touré, 2011).

A ces impacts négatifs dus à la pression démographique s'ajoutent les effets des conditions climatiques difficiles. En effet, au cours du siècle passé, le Sahel a connu une variation climatique spectaculaire : il est passé d'un Sahel humide dans la période 1930-1968 à un Sahel relativement sec dans la période 1968-2000 (Lebel et Ali, 2009). La période sèche dite « grande sécheresse au Sahel » a gravement accru la vulnérabilité des sociétés, des milieux et des ressources, en particulier l'eau, les sols et la végétation, bases des productions socio-économiques (Descroix et Diedhiou, 2013; Malam Abdou, 2014). Elle s'est soldée par

la baisse considérable des productions agricole et pastorale, une dégradation environnementale importante et la mort des milliers de personnes (Bonnecase, 2010).

La vulnérabilité des sociétés sahéliennes face à la variabilité climatique et à la forte anthropisation des ressources naturelles liée à leur surexploitation est exacerbée par des sols dont les caractéristiques intrinsèques et l'état de dégradation physique et chimique constituent des facteurs contraignant pour le maintien d'un potentiel de production agricole et forestier durable (Pieri, 1989; Gandah et al., 2000; Breman et al., 2001; Sanchez, 2002; Descroix et Diedhiou, 2013). Ces sols sont, en effet, caractérisés par une faible production et un taux de renouvellement rapide des matières organiques due à des températures élevées, à une forte activité faunique, en particulier celle des termites, et à une faible teneur en argile du sol (Bationo et al., 2007). Par conséquent, les teneurs en carbone organique (De Rouw, 1998) et en phosphore, ainsi que la capacité d'échanges cationiques de ces sols sont intrinsèquement très faibles (Buerkert et al., 1997; Bationo et al., 2007). Ils sont davantage appauvris par des mises en culture prolongées sans renouvellement adéquat des éléments nutritifs et le ramassage systématique des résidus de cultures après les récoltes. A ces facteurs d'appauvrissement d'origine anthropique s'ajoutent l'érosion hydrique et l'érosion éolienne. Celles-ci entrainent d'une part, la perte considérable et sélective des nutriments et des terres cultivables (Abdourhamane Touré, 2011; Bielders et al., 2002; Malam Abdou, 2014; Malam Abdou et al., 2016; Peugeot, 1995; Pierre et al., 2018) et, d'autre part, la formation des encroûtements superficiels (Casenave et Valentin, 1989). Des études à différentes échelles ont montré que ces encroutements limitent l'infiltrabilité des sols et la capacité de production des agrosystèmes sahéliens (Valet et al., 2007). Les pertes en matières organiques et en nutriments sont ainsi accentuées par les effets conjugués de l'érosion et des facteurs anthropiques. Leurs quantités en carbone diminuent chaque année, avec des pertes annuelles moyennes de 4,7 % sur les sols sableux et de 2 % sur les sols sablo-limoneux (Bationo et al., 2007). Les pertes en azote dans ces sols sont estimées à 4,4 millions de tonnes pour un apport annuel estimé à seulement 0,8 million de tonnes. La quantité de phosphore perdue est de 0,5 million de tonnes contre 0,3 million de tonnes appliquées et enfin 3 millions de tonnes de potassium perdues contre seulement 0,2 million de tonnes apportées (Bationo et al., 2004).

C'est dans ce contexte qu'est cultivé le niébé une des principales légumineuses

alimentaires mondiales, cultivé sur une surface d'environ 14 millions d'hectares pour une production annuelle dépassant 4,5 millions de tonne (Singh et al., 2003). Plus de 87 % de cette production proviennent de l'Afrique (Langyintuo et al., 2003 ; Folefack et al., 2013), principalement de l'Afrique de l'Ouest où la culture du niébé occupe 9,3 millions d'hectares pour une production annuelle de 2,9 millions de tonnes (Fatokun et al., 2002).

Au Niger, deuxième grand producteur du niébé derrière le Nigeria, plus de 5 millions d'hectares sont emblavés avec du niébé pour une production annuelle de 1,5 million de tonnes soit le quart de la production agricole nationale et 80% des cultures de rente (Diallo et al., 2012 ; Kadri et al., 2013). L'intérêt de cette culture réside d'abord dans sa valeur économique pour ce pays ; 74% de la production nationale sont destinés à l'exportation pour une valeur estimée à 58 milliards de FCFA en 2009 (Doumma, 2011). Les graines de niébé contiennent la plupart des acides aminés indispensables à la nutrition humaine et animale (Oumarou et al., 2010 ; Baoua et al., 2013). Leurs teneurs en protéines représentent 22 à 25 % de leurs poids secs, soit 3 à 4 fois les teneurs en protéines du mil et du sorgho. En tant que source de protéines la moins onéreuse, cette culture joue un rôle important dans l'alimentation des populations et de leurs bétails (Moumouni et al., 2013). Au-delà de son intérêt économique et alimentaire, le niébé revêt aussi un intérêt écologique. Il appartient à la famille des légumineuses, c'est-à-dire des plantes capables de fixer l'azote atmosphérique à travers des nodosités formées par la relation symbiotique entre leurs racines et des bactéries fixatrices d'azote (Rhizobium). Des études ont montré qu'à travers cette symbiose le niébé améliore la fertilité chimique des sols (Bationo, 2000 ; Bado, 2002 ; Doumma et al., 2011 ; Diop et al., 2013 ; Aboubacar et al., 2013 ; Diop et al., 2013). La croissance rapide et le recouvrement important observés chez les variétés rampantes de niébé, fréquentes chez les paysans, protègent la surface du sol contre l'érosion hydrique et limitent la perte de la réserve hydrique par évaporation (Stoop, 1986 ; Singh et al., 2003 ; Dabat et al., 2012). Le niébé se cultive sur une large gamme de sol y compris des sols pauvres avec plus de 85% de sable, moins de 0,2% de matière organique et des teneurs en phosphore faibles (Dakora et Keya, 1997 ; Kolawale et al., 2000 ; Sanginga et al., 2000). En dépit de cette adaptation aux conditions extrêmes, la production de niébé se traduit par une baisse de rendement de 50 à 55% par rapport au rendement optimal. Cette baisse de rendement est due aux facteurs sociaux et environnementaux, notamment les incertitudes climatiques, l'évolution des

caractéristiques du sol, les contraintes sociales et/ou culturelles, la disponibilité ainsi que l'adaptation et la vulnérabilité des semences selon les zones agroécologiques (Tafffoua et al., 2008 ; Dabat et al., 2012 ; Toudou et al., 2016)

Le présent travail s'inscrit dans le cadre du projet COPRONNIGER (COntraintes socio-environnementales liées à la PROduction du Niébé au NIGER) financé par la Banque Mondiale à travers le Programme de Productivité Agricole en Afrique de l'Ouest (PPAAO). Son objectif général est de développer une approche intégrée pour comprendre et hiérarchiser les principaux facteurs sociaux et environnementaux limitant la production du niébé au Niger.

Le travail conduit dans le cadre de cette thèse est axé sur les contraintes pédologiques majeures, notamment l'hétérogénéité et la variabilité de surface du sol identifiée comme une caractéristique déterminante pour le potentiel de production des sols (Figure 1). Elle s'observe à l'échelle locale, intra ou inter-parcellaire à travers l'apparition des entités de surface homogènes disparates, chacune ayant des caractéristiques intrinsèques spécifiques (Thiombiano, 2000 ; Gandah et al., 2000 ; Brouwer, 2008). Elle 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. Liées à des facteurs climatiques et biologiques et l'impact des activités humaines, ces modifications influent sur le fonctionnement, l'état de fertilité, la qualité physique et chimique du sol (Harper et al., 1965 ; Casenave et Valentin, 1989 ; Malam Issa, 2007 ; Brouwer, 2008). (Casenave et Valentin, 1989) ont étudié le processus de formation de l'encroutement superficiel et ont abouti à la réalisation d'une typologie des principaux états de surface du sol. Ces états de surface constituent l'une des facettes de la variabilité et de l'hétérogénéité de surface qui caractérisent les sols en zone sahélienne (Thiombiano, 2000).

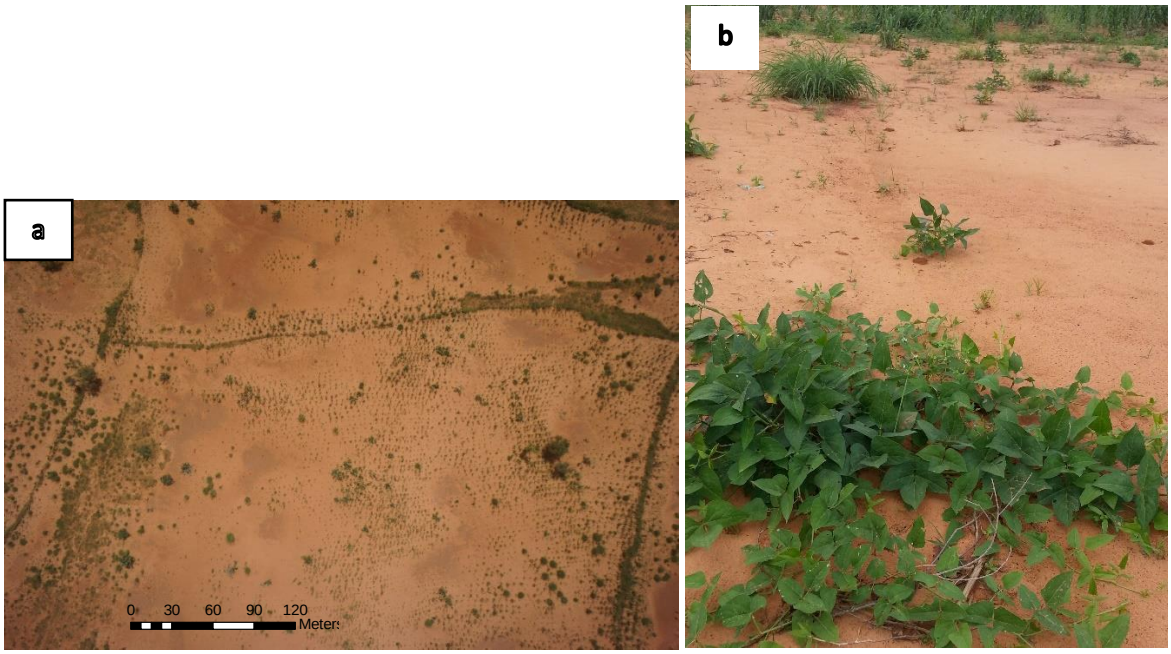


Figure 1: a) image aérienne illustrant l'hétérogénéité de surface du sol, (b) vue de la surface d'un champ dans le terroir de Sadoré, région de Tillabéri au Niger. Noter l'influence de l'hétérogénéité de surface du sol sur la croissance du niébé.

De nombreux travaux ont montré les liens existants entre les modifications des états de surface et la variabilité spatiale et temporelle induites sur les propriétés physiques et chimiques des sols, d'une part, la variabilité de la croissance et des rendements de cultures en zone sahélienne du Niger d'autre part (Milleville et Serpantié, 1992 ; Brouwer et al., 1993 ; Gandah, 1999; Gandah et al., 2000 ; Thiombiano, 2000 ; Batchelor et al., 2002 ;Vootman et al., 2004 ; Brouwer, 2008 ; Koné et Assa, 2008 ; Abril et al., 2009 ; Cruz et al., 2008 ; Tittonell et al., 2013 ; Turner et Hiernaux, 2015). L'hétérogénéité de surface du sol se manifeste par la perte totale de la production des cultures sur certaines surfaces à l'intérieur des parcelles agricoles au Niger (Figure 1).

La prise en compte de l'hétérogénéité de surface du sol s'avère être d'un intérêt majeur pour la gestion précise des amendements visant à améliorer la quantité et la qualité des cultures tout en respectant l'environnement (Gandah et al., 2000; Aranyos et al., 2016; Awe et al., 2015; Gajda et al., 2016; Tola et al., 2017). Notre travail s'inscrit dans cette perspective. Il tente de répondre aux questions suivantes : comment l'hétérogénéité de surface du sol est-elle perçue par les producteurs du niébé ? Quelles sont les approches et stratégies paysannes développées pour la gestion de l'hétérogénéité de surface du sol ? Quels sont les types et les caractéristiques des entités homogènes de surface qui constituent les champs paysans ? Quelles sont les contraintes physiques et chimiques liées à ces entités

homogènes du sol vis-à-vis de la production du niébé ? Quelle est l'efficacité des stratégies paysannes pour améliorer la fertilité du sol et leurs impacts sur les entités homogènes de surface du sol à contraintes ?

L'objectif de cette thèse est d'évaluer l'importance de la prise en compte de l'hétérogénéité spatiale et fonctionnelle de la surface du sol sur la production du niébé à l'échelle des systèmes d'exploitation familiale au Niger. Il s'agira plus spécifiquement de : (i) comprendre les savoirs locaux sur les formes d'hétérogénéité de surface du sol et leurs gestions dans la culture du niébé ; (ii) hiérarchiser les différentes entités homogènes de surface du sol selon ces savoirs locaux ; (iii) cartographier et caractériser l'hétérogénéité de surface du sol ; (iv) comprendre son influence sur le fonctionnement et les propriétés hydrodynamiques des sols ; (v) évaluer l'impact de l'hétérogénéité de surface du sol sur la production du niébé et (vi) évaluer l'effet des pratiques paysannes de gestion de la fertilité et de la qualité du sol sur la production du niébé.

Ce document sera organisé de la façon suivante : cette partie introductive sera suivie d'une revue bibliographique qui précisera, les notions liées à l'hétérogénéité de la surface de sol dans le chapitre 1, ainsi que les caractéristiques et les spécificités du niébé et de sa culture dans le chapitre 2. Le chapitre 3 présentera les sites d'étude et leur cadre général, notamment les caractéristiques physiques et les conditions socio-économiques du milieu. Le chapitre 4 traite des savoirs locaux sur les formes d'hétérogénéité de surface du sol et leurs gestions dans la culture du niébé. Les données sur la caractérisation pédologique des entités homogènes de surface du sol et la démarche de cartographie l'hétérogénéité seront présentés dans le chapitre de cette partie chapitre 5. Le chapitre 6 traite de l'influence de l'hétérogénéité de surface sur le fonctionnement et les propriétés hydrodynamiques des sols. Le chapitre 7 expose l'effet de l'hétérogénéité de surface du sol sur la production du niébé. Le dernier chapitre 8 de la présentation des résultats sera consacré à l'évaluation des pratiques paysannes de gestion de la fertilité et de la qualité du sol sur la production du niébé. La dernière partie de ce document sera consacrée à une discussion générale (chapitre 9). Une conclusion générale et perspective clôturera le manuscrit.

Chapitre 1 : Quelques notions sur l'hétérogénéité de la surface du sol

L'hétérogénéité d'un système se rapporte à la complexité et/ou à la variabilité de ses propriétés ou caractéristiques définies dans les dimensions spatiales ou temporelles (Li et Reynolds, 1995). Elle peut être structurelle ou fonctionnelle selon Li et Reynolds (1995). L'hétérogénéité structurelle est définie relativement à la complexité ou à la variabilité de la propriété du système sans faire référence au processus qui sous-tend cette propriété. L'hétérogénéité fonctionnelle quant à elle se rapporte à la mesure de la propriété en lien avec un processus. Nous reprenons ici un exemple issu des travaux de Tourino Soto (2005) qui illustre la notion d'hétérogénéité fonctionnelle et structurelle en considérant le rendement d'une culture en tant que processus. La variabilité de ce processus est une réponse aux variations des propriétés du sol de la parcelle. On étudie alors l'hétérogénéité fonctionnelle du sol dans le processus de rendement (Garrigues, 2004 ; Tourino Soto, 2005). Par ailleurs, le rendement peut être considéré comme une propriété de surface mesurable dont les variations à l'intérieur de la parcelle représentent son hétérogénéité structurelle. L'hétérogénéité structurelle de la surface du sol peut donc se définir à travers la variabilité intra ou inter-parcellaire ou la configuration spatiale des entités de surface homogènes qui la compose (Thiombiano, 2000 ; Gandah et al., 2000 ; Brouwer, 2008). Cette définition ne prend pas en compte le processus à l'origine de l'apparition de ces différentes entités. Celui-ci est le résultat d'interactions diverses mettant en jeu le climat, le sol, les organismes du sol, la végétation et les activités humaines (Escadafal, 1989 ; Malam Issa, 2007). Il se traduit par la variabilité des propriétés caractéristiques des différentes entités de surface homogènes. A titre d'exemple, les formes d'hétérogénéité de surface du sol peuvent résulter de la redistribution des matières en lien avec l'érosion hydrique ou l'érosion éolienne dont l'intensité varie en fonction de la nature du sol, du couvert végétal, de la morphologie du terrain, ainsi que des facteurs anthropiques et climatiques. Ce processus conduit à l'apparition des entités homogènes tantôt appauvries (zones érodée) ou enrichies (zones d'accumulation) en éléments fins et en nutriments. Les propriétés d'infiltration de l'eau dans ces sols diffèrent également d'une entité à une autre.

1.1. Les facteurs de l'hétérogénéité de la surface du sol

L'hétérogénéité de la surface du sol résulte des interactions entre des facteurs naturels, notamment les conditions du milieu (climat, relief, nature des sols), des facteurs biologiques auxquels s'ajoutent les activités humaines telles que les pratiques culturales et l'aménagement 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 travaux qui seront conduits ici seront principalement axés sur les parcelles paysannes. Elles prennent en compte les formes d'hétérogénéité qui sont liées à la redistribution des matières en lien avec l'érosion et le ruissellement, à l'évolution des états de surface, à la présence du couvert agroforestier, aux activités de la faune du sol et les aménagements et pratiques agricoles.

1.2.1. L'érosion hydrique et l'érosion éolienne

L'érosion est d'abord un phénomène naturel qui façonne la surface de la terre depuis son origine. Elle regroupe : l'érosion hydrique liée à la dynamique de l'eau sous toutes ses formes, l'érosion éolienne liée au vent, l'érosion volcanique, karstique, biotique, etc. Elle s'étudie à des échelles de temps (temps géologiques, saisons, cycle cultural, etc.) et d'espace (placette expérimentale, parcelle cultivée, bassin versant agricole ou bassins des grands cours d'eau) très variées. La présente revue sera limitée à l'érosion des sols, notamment l'érosion hydrique et l'érosion éolienne à l'échelle de la parcelle cultivée.

Ces deux formes d'érosion sont des processus complexes qui dépendent des propriétés du sol, la pente, la végétation, l'intensité et la quantité des pluies, ainsi que du vent. Elles intègrent plusieurs processus : le détachement et le cisaillement des particules par les gouttes de pluie ou la lame d'eau de ruissellement ; l'arrachement par la déflation liée au vent ; le transport par ruissellement ou par saltation, reptation ou suspension par le vent et, enfin le dépôt des particules (Abdourhamane Touré, 2011). Chacun de ces processus intervient potentiellement dans la remobilisation, le transfert et l'accumulation de matières à l'échelle du paysage, des agroécosystèmes et au sein des parcelles agricoles. Ils jouent à ce titre un rôle majeur dans l'apparition de l'hétérogénéité structurelle et fonctionnelle de la surface du sol.

La quantification des particules de sol remobilisées, transférées et/ou déposées en lien avec l'érosion éolienne et l'érosion hydrique en zone sahélienne a fait l'objet de plusieurs travaux (Rajot, 2001 ; Tidjani, 2008 ; Tidjani et al., 2009 ; Abdourhamane Touré, 2011 ; Bieldiers et al., 2000,2004 ; Valentin et al., 2004 ; Descroix et al., 2012 ; Descroix et Diedhiou, 2013 ; Abdourhamane Touré, et al., 2017 ; Hamadou Younoussa et al., 2018). Les quantités mesurées dans l'ouest du Niger sur des sols nus soumis à l'érosion éolienne sont estimées à 42000 kg/ha en 2006 et 159000 kg/ha en 2007 (Abdourhamane Touré, 2011). Ces valeurs sont du même ordre de grandeur que celles obtenues dans la même région, soit 17000 kg/ha en 1995 et 214000 kg/ha en 1997 (Bielders et al., 2000). L'influence des pratiques culturales sur l'intensité de ce phénomène se traduit par les fortes variabilités interparcellaires : des pertes en terre de 20000 kg/ha associées à des dépôts de 15000 kg/ha observés sur des distances de quelques dizaines de mètres au sein d'un même champ et au cours d'un même évènement érosif (Bielders et al., 2004). L'ensemble de ces travaux montrent la variabilité interannuelle et temporelle des quantités de terres déplacées par l'érosion éolienne à la surface des sols. Les résultats acquis par Descroix et Diedhiou (2013) dans l'Ouest nigérien à l'échelle des parcelles de 10 m² indiquent une mobilisation de particules par l'érosion hydrique de 373 kg/ha/an dans les champs cultivés en mil et 881 kg/ha dans les jachères. Cette mobilisation de particules par l'érosion hydrique est beaucoup plus prononcée lorsqu'il s'agit des surfaces encroûtés ou soumises au pâturage. Les quantités de terres mobilisées sur des surfaces pâturées (Karambiri et al., 2003) en zone sahélienne du Burkina Faso atteignent 4000 à 8400 kg/ha/an. Les valeurs obtenues sur les surfaces à croûte d'érosion atteignent 5600 kg/ha/an et presque 900 kg/ha/an sur les croûtes biologiques sur des sols sableux de l'Ouest nigérien (Descroix et al., 2012). Ces pertes en terres s'accompagnent par des pertes en éléments nutritifs très souvent associés à la fraction minérale fine. Ainsi des quantités de carbone et d'azote transférées par l'érosion hydrique des sols dans le Sahel burkinabé peuvent atteindre 160 kg/ha et 10 kg/ha sur les parcelles de jachère contre 108 à 350 kg/ha de carbone et 8 à 27 kg/ha d'azote total dans les champs cultivés (Bilgo et al., 2001). Des pertes de l'ordre de 57,1 kg/ha de potassium, 6,1 kg/ha de phosphore, 79,6 kg/ha de carbone et 8,3 kg/ha d'azote ont été associées à la mobilisation de plus de 38 t ha^{-1} de particules de sols mesurées au cours de deux évènements érosifs successifs d'origine éolienne (Sterk et Stein, 1997). Ceci équivaut

approximativement à la quantité de potassium et phosphore nécessaire pour produire 2600 kg/ha de matière sèche de mil, dont 600 kg/ha de grain (Sterk et Stein, 1997 in Touré 2011).

Les actions conjuguées de l'érosion hydrique et de l'érosion éolienne sont des facteurs majeurs de l'hétérogénéité de surface du sol. Elles constituent également une menace pour la durabilité des agroécosystèmes et la productivité des terres dans le monde entier, et en particulier dans les zones arides comme le Sahel. Elles sont la cause principale de dégradation pour près de 65 % des ressources mondiales en sols, soit 1,9 milliard d'hectares (FAO, 2018). L'érosion des sols provoquent chaque année la perte de plus de 36 milliards de tonnes de terres fertiles avec une baisse de rendement associée en moyenne de 0,3 % pour un coût économique estimé à 400 milliards de dollars US (FAO, 2018). Dans l'hypothèse où ce taux de perte demeure inchangé, une réduction des récoltes potentielles annuelles de 10 % se produirait d'ici 2050, équivalente à la suppression de 150 millions d'hectares de surface agricole ou 4,5 millions d'hectares par an (FAO, 2015a).

La redistribution et les transferts de nutriments associés à l'érosion hydrique et à l'érosion éolienne, sont les mécanismes d'apparition de l'hétérogénéité de la surface du sol. Ils se traduisent par l'apparition d'une hétérogénéité structurelle marquée par des entités homogènes distinctes associant des zones source et des zones puits. Les zones de dépôts forment des îlots de fertilité telle que celles qui se forment autour des arbustes sous l'influence du vent. Elles se caractérisent sur le plan fonctionnel par des conditions favorables au développement des cultures (Bationo *et al.,* 2012). Les entités homogènes peuvent également être, des loupes d'érosion, c'est-à-dire des zones de départ qui se caractérisent sur le plan fonctionnel par des conditions défavorables au développement de la végétation.

1.2.2. L'évolution des états de surface

Le terme « états de surface du sol » employé ici fait référence à la couverture et l'état des premiers centimètres du sol. Ce terme dans son sens large désigne les encroûtements superficiels, le couvert végétal (Papy et Boiffin, 1988 ; Martin, 1999 ; Roth, 2004), le couvert pierreux (Casenave et Valentin, 1989 ; Descroix et al., 2000 ; Li et al., 2000) et la rugosité de surface (Boiffin, 1984 ; Van Dijk et al., 1996). Ces différentes formes d'états de surface du sol

jouant un rôle majeur dans l'apparition de l'hétérogénéité structurelle et fonctionnelle des sols sahéliens sont décrites ci-après.

1.2.2.1. Les encroûtements superficiels

Les encroûtements superficiels sont des états de surface composés d'un ou plusieurs microhorizons de quelques mm à quelques cm d'épaisseur ayant des caractéristiques physiques et chimiques distinctes de celles des horizons sous-jacents (Boiffin, 1984 ; Asseline et al., 1987 ; Auzet et al., 1990 ; Casenave et Valentin, 1989 ; Malam Issa, 2007). La figure 2 illustre la clé de détermination des croûtes en zone sahélienne.

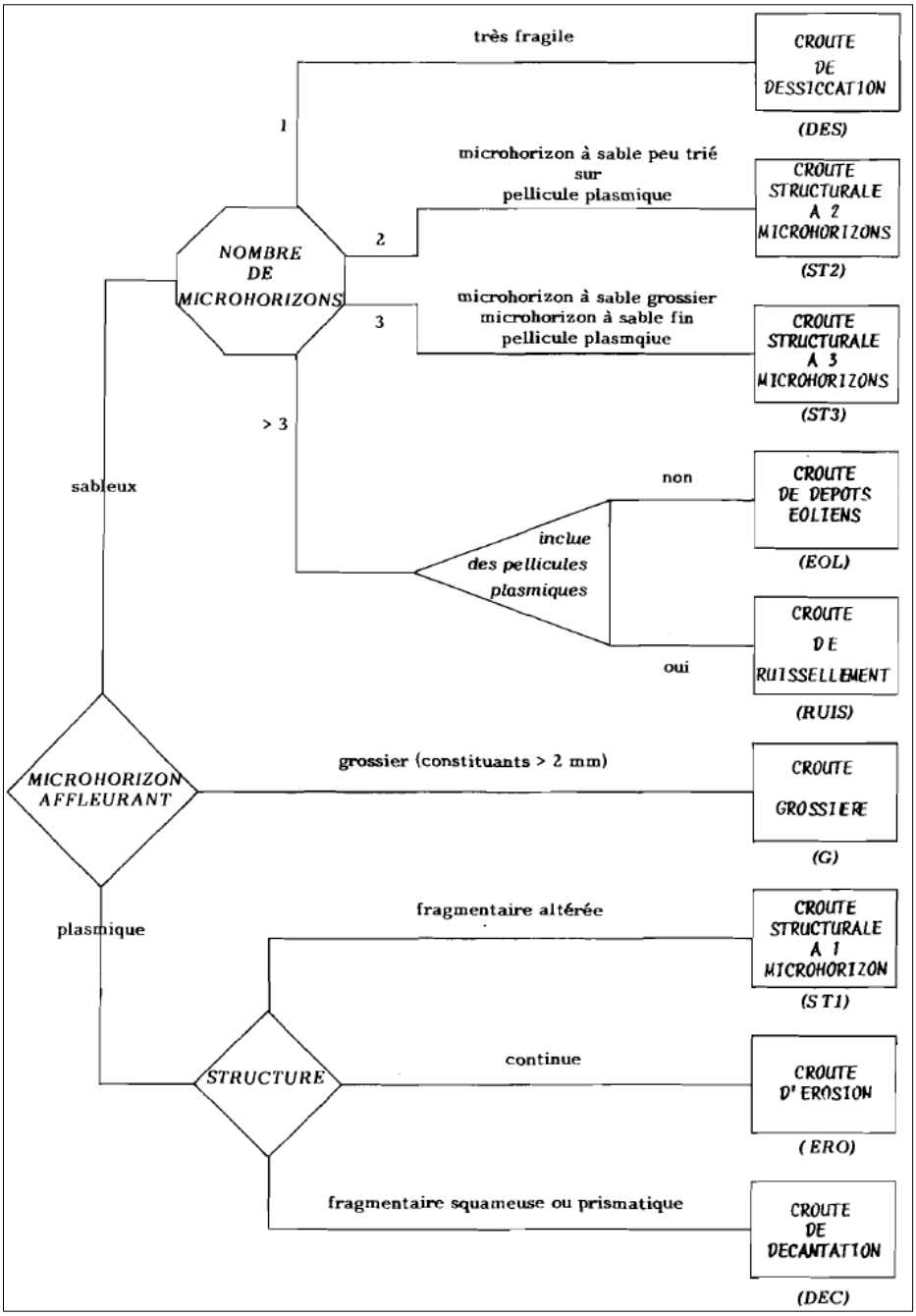


Figure 2: Clef de détermination des croûtes physiques (Casenave et Valentin, 1989)

Les encroûtements résultent de l'action érosive de l'eau de pluies, de l'activité de micro-organismes et des activités humaines. Cette définition recouvre deux types de croûtes :

- les croûtes physiques dont la formation résulte de la mobilisation de particules du sol par l'humectation, les actions érosives des gouttes de pluies, du ruissellement et du vent, suivie éventuellement par d'autres processus physico-chimiques comme la redistribution, le dépôt de particules par décantation (Casenave et Valentin, 1989 ; Le Bissonnais et al., 1989 ; Le Bissonnais et Bruand, 1993 ; Casenave et Valentin, 1992 ;

Nishimura et al., 1993 ; Ambouta, 1994 ; Valentin et Bresson, 1992). La typologie morphogénétique des croûtes physiques établie en zone sahélienne par Casenave et Valentin (1989), en tenant compte de la taille des matériaux, le mode de formation et l'organisation des microhorizons, distingue :

- Les croûtes structurales (ST). Elles se forment par la réorganisation *in situ*, sans mouvement latéral des particules de sol mobilisées. Les croûtes structurales issues d'aggregat de matériaux sableux, se caractérisent par un tri granulométrique de particules du sol montrant trois ou deux microhorizons. Les croûtes structurales à trois micro-horizons (ST3) montrent une stratification complète de haut en bas un microhorizon de sables grossiers libres en surface, un microhorizon intermédiaire de sables fins surmontant un niveau de particules fines (argiles et limons fins) situé à la base. Ce niveau appelé également pellicule plasmique est peu épais, mais dur (Casenave et Valentin, 1989 ; Peugeot, 1995). Le microhorizon intermédiaire et celui de base sont associés à une forte porosité vésiculaire, formée par l'éclatement de bulles d'air piégées au début des averses. Les croûtes structurales à deux micro-horizons (ST2) se composent d'un microhorizon de sables peu triés, souvent pris en masse, recouvrant une mince pellicule plasmique. La porosité vésiculaire associée à ces deux microhorizons est peu marquée. Les croûtes structurales formées sur des matériaux constitutifs dominés par les argiles et les limons montrent un seul micro-horizon ou pellicule structurale (ST1), formé par des anciens agrégats partiellement fondus dans la croûte (figure 3) ;

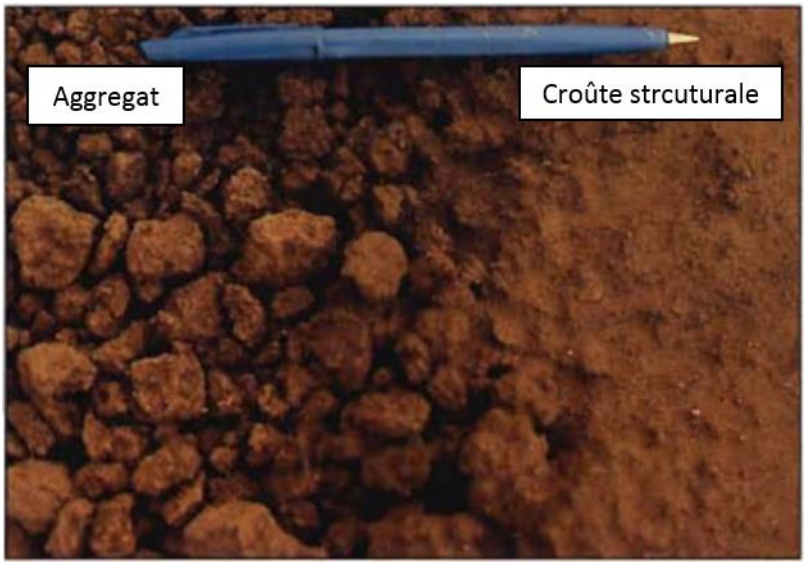


Figure 3 : photo d'une croûte structurale (Casenave et Valentin, 1989)

- Les croûtes de dépôt. Elles se forment par dépôt des particules transportées par l'eau de ruissellement ou par décantation de particules en suspension dans les flaques d'eau après la pluie ou soit par le vent. Ainsi distingue-t-on trois types de croûtes de dépôt :
  - La croûte de décantation (DEC). Elle se forme par décantation de particules dans l'eau au repos. Elle est caractérisée par un tri granulométrique vertical très net, inverse de celui rencontré dans les croûtes structurales à trois microhorizons (ST3). Les sables sont à la base tandis que les argiles se trouvent au sommet. Elle se craquelle et se fend en séchant et forme des fentes de retrait (figure 4) ;

Figure 4 Photo d'une croûte de decantation

- La croûte de ruissellement (RUI) se formant par le dépôt des particules transportées par la lame d'eau ruisselante. Elle est composée par une alternance de microhorizons sableux et argileux, peu triés. Son épaisseur peut atteindre plusieurs centimètres. Elle présente fréquemment une forte porosité vésiculaire. En milieu naturel, elle se localise le long des axes d'écoulement et recouvre des croûtes structurales formées avant l'apparition du ruissellement (figure 5);

Figure 5: Photo d'une croûte de ruissellement (Casenave et Valentin, 1989)

- La croûte de dépôts éoliens (EOL): elle se forme autour des dunes ou barrières végétales qui font obstacles au vent et provoquent le dépôt de sable fin transporté par la déflation éolienne (figure 6). Elle est caractérisée par des microhorizons de sables fins, bien triés pouvant évoluer en croûte de dessiccation ou en croûte structurale lorsqu'elle subit des apports en particules fines ;

Figure 6: Photo d'une croûte de dépôt éolien

- Les croûtes de dessiccation (DES). Elles se forment sur des matériaux très sableux, protégé de l'impact de gouttes de pluie, néanmoins soumis à des cycles de dessiccation/humectation. C'est le cas des accumulations sableuses portant un couvert herbacé dense. Le mécanisme de formation de ces croûtes consiste principalement en une prise en masse légère de l'horizon superficiel. Cette croûte se caractérise donc par l'affleurement d'un micro-horizon sableux, unique, légèrement pris en masse, très fragile, pouvant atteindre plusieurs dizaines de millimètres d'épaisseur. Ce type de croûte recouvre fréquemment les micro-buttes sableuses enherbées (figure 7);

Figure 7: Photo d'une croûte de dessication (Casenave et Valentin, 1989)

- Les croûtes d'érosion (ERO) dont le processus dominant est l'arrachement des particules de sol par l'eau et le vent. Elle se forme au dépens des croûtes structurales argileuses par le choc répété des gouttes de pluie sur la croûte reste exondée conduisant à la formation d'une pellicule très compactée riche en élément fin (figure 8 ; Casenave et Valentin, 1989). La conséquence est la diminution de la rugosité et la

disparition progressive des restes d'agrégats. La croûte d'érosion peut se former également des croûtes structurales sableuses riches en sables fins lesquels sont plus sensibles à l'arrachement de ruissellement ou la déflation (Casenave et Valentin, 1989). Il résulte un affleurement une couche dure constituée des éléments les plus fins et éventuellement les plus grossières. Enfin, les croûtes d'érosion peuvent se former au dépens des croûtes de ruissellement lorsque par augmentation de la vitesse de ruissellement les mécanismes de dépôts sont limités et l'arrachement accentué (Casenave et Valentin, 1989).

Figure 8:Photo d'une croûte de d'érosion (Casenave et Valentin, 1989)

- les croûtes biologiques ou croûtes microbiotiques (BSC), complexes organo-minéraux dont la formation résulte essentiellement de la croissance de communautés de micro-organismes photosynthétiques et l'apport d'éléments organiques d'origine microbienne dans le sol (figure 9 ; Malam Issa et al. 2007). Le cortège d'organismes qui constituent ces croûtes est composé en majorité de cyanobactéries, accompagnées par des algues vertes, de lichens et de bactéries et accessoirement de diatomées et de mousses (Belnap et al., 2001 ; Malam Issa, 2007). La plupart de ces organismes se développent à la surface des sols nus, au sommet de croûtes physiques. D'autres vivent à quelques millimètres de profondeur, en particulier lorsque la teneur en eau du sol diminue, comme en période de sécheresse ou durant la saison sèche, et migrent vers la surface pendant les périodes humides.

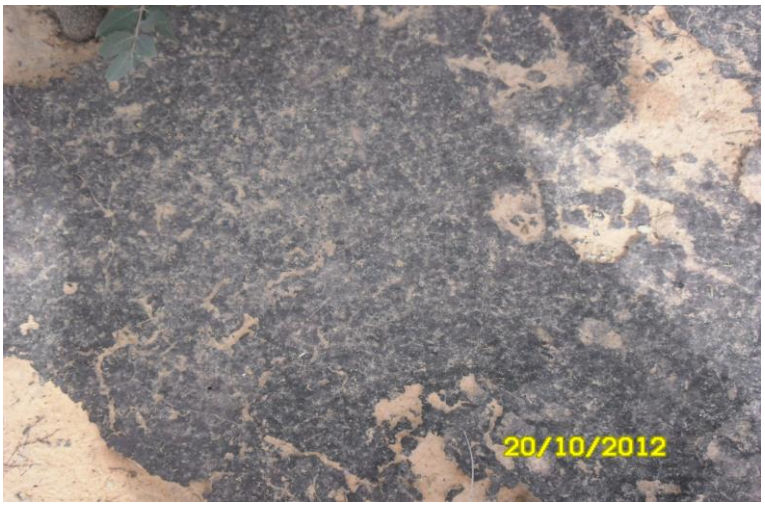


Figure 9: Photo d'une croûte microbiotique (Seyni Bodo, 2013)

Le développement des encroûtements physiques ou biologiques affectent le fonctionnement des écosystèmes sahéliens, notamment à travers la régulation des flux d'eau (partage ruissellement/infiltration), de matière solide ou dissoute (particules érodées, éléments dissous) et de gaz (CO2, N2, O2…). Le développement des croûtes physiques s'accompagnent de la baisse de l'infiltrabilité et l'augmentation du ruissellement et de la cohésion des particules, accompagnées par des conséquences considérables sur le plan environnemental et économique (inondation, pollution, mauvaise levée des cultures, diminution de la fertilité, baisse de la productivité). Ce sont là des signes évidents de la dégradation des sols. La formation des croûtes biologiques quant à elle stabilise la surface du sol en favorisant la formation des agrégats organo-minéraux (Malam Issa et al., 2001), améliore la capacité de rétention en eau et les caractéristiques chimiques des sols (Malam Issa et al., 2011; Rodríguez-Caballero et al., 2013, 2012).

1.2.3. Le microrelief et la rugosité de surface

Le terme microrelief fait référence ici à l'ensemble des petits accidents du terrain, naturels ou induits par les techniques culturales, d'épasseur comprise entre 5 et 50 cm, qui confère au sol la rugosité susceptible de diminuer le ruissellement et d'augmenter le stockage superficiel de l'eau (Casenave et Valentin, 1989 ; Esteves et Lapetite, 2003; Mounirou, 2012). Dans une certaine mesure ce terme se rapporte également aux inégalités du relief de petite amplitude de l'ordre de quelques mètres. On parle alors de microtopographie du sol (Ftorinsky *et al.,* 2000).

En plus de son effet sur le régime hydrique des sols, le microrelief influe sur le transfert des nutriments, la dynamique de l'érosion et la variabilité des rendements des cultures à l'intérieur des parcelles agricoles (Wang *et al.,* 1995 ; Timlen *et al.,* 1999 ; Perron, 2002 ; Tourino Soto, 2005). Le microrelief induit par le travail du sol a une influence sur la capacité de rétention en eau et les rendements des cultures (Christianson et al., 1990 ; Saxena et al., 1997 ; Planchon et al., 1999 ; Copec et al., 2005 ; Samarajeewa et al., 2006). Cette propriété est particulièrement intéressante dans le cas des plantes cultivées sub-sahariennes, comme le mil et l'arachide (Planchon et al., 1999). Copec et al. (2005) ont montré que le labour de conservation entraine des meilleurs rendements du maïs et du blé sur des sols limoneux en Croatie. Le travail du sol en profondeur améliore le stockage de l'humidité et les rendements en grain du mil sur des sols sableux en zone aride de l'Inde (Saxena et al., 1997). Sur des sols similaires au Niger, la même tendance sur les rendements en mil semble être trouvée par Christianson et al. 1990). L'influence de la topographie sur la variabilité spatiale des rendements et des propriétés des sols dans les parcelles agricoles a été illustrée par de nombreux travaux aussi bien en zone tempérée qu'en zone sahélienne (Geiger et Manu, 1993; Guo et al., 2012; Kaspar et al., 2003; Kravchenko et Bullock, 2000; Li et al., 2001). Les résultats obtenus sur des cultures de maïs par Kravchenko et Bullock, (2000) indiquent que le microrelief expliquerait 6-54% (20% en moyenne) de la variabilité des rendements, tandis que les propriétés du sol expliqueraient 5 à 71% (30 % en moyenne) de cette variabilité. Geiger et Manu (1993) ont montré que les meilleurs croissances et rendements du mil dans l'Ouest du Niger sont associés aux bombements sableux autour des espèces végétales telles que *Guiera senegalensis, Combretum glutinosum ou Piliostigma reticulatum*. Ces bombements constituent des positions topographiques ou micro-topographiques élevées. Les plus faibles rendements sont associés au niveau des surfaces d'érosion dans les champs agricoles. Les positions topo et ou micro topographiques concaves, en général accumulatrices d'eau, peuvent être catastrophiques pour des cultures sensibles à l'anoxie dans les parcelles agricoles durant des périodes humides (Tourino Soto, 2005). Elles deviennent très intéressantes et favorables aux cultures en périodes sèches (Tourino Soto, 2005).

1.2.4. Activités biologiques

Ce paragraphe fait référence aux activités biologiques liées à la macrofaune des sols, principalement les termites et les fourmis. Ces organismes jouent un rôle majeur dans le fonctionnement chimique et physique de nombreux écosystèmes tropicaux et subtropicaux.

Les termites sont parmi les principaux macro-invertébrés intervenant dans le recyclage et la décomposition de la matière organique dans les milieux arides et semi-arides (Jouquet *et al.,* 2014). Ils sont considérés comme des ingénieurs écosystémiques (Jouquet *et al.,* 2006) qui structurent et remanient la surface du sol, brisent les organisations superficielles et créent localement un réseau de macropores à travers leurs activités de récolte et d'ingestion de débris végétaux, la construction de galerie et l'édification des bio-construction (Figure 10 ; Janeau et Valentin, 1987 ; Tano et Lepage, 1990 ; Loko et al., 2017). Ainsi facilitent-ils la circulation et la rétention de l'eau dans les horizons profonds du sol tout en constituant des foyers de redistribution des éléments organiques et nutritifs (Holt et Lepage, 2000 ; Jouquet *et al.,* 2006 ; 2011 ; 2012 ; Seymour et al., 2014). Les résultats obtenus par Konaté et al. (1999) à trois profondeurs du sol (0-0,3 m, 0,3-0,06 m et 0-0,6 m) montrent des valeurs de réserves utiles plus élevées en présence des termitières (54, 58 et 112 mm) comparées à celles d'un sol témoin où les activités des termites sont absentes (50, 34 et 84 mm). Les termitières concentrent des quantités en azote et en phosphore respectivement de 2,5 et 35 fois plus élevées que celles rencontrées dans les sols témoins (Brauman, 2000). Le taux de carbone total des termitières dans les savanes est de 2,5 % contre 0,8 % sur les sols témoins et 1,5 % à 4,3 % dans les forêts.

Figure 10: Quatre principales catégories de bio-construction des termites reconnues par les agricultures au Benin. (a) Grande termitière ; (b) petite termitière ; (c) termitières développées sur des débris végétaux ; (d) termitières fongiformes (Loko et al., 201

Les fourmis partagent avec les termites les mêmes propriétés vis-à-vis de l'infiltration de l'eau, la décomposition et le recyclage des matières organiques. Leurs actions passent également par les activités de récolte de nourriture, la construction de galeries souterraines et la formation de monticules (bioturbation). Elles se traduisent par le remaniement de la structure du sol (porosité, densité apparente), le mélange des matériaux, le transfert des nutriments, le renouvellement en continue des horizons pédologiques (Dostál et al., 2005). (Dupuis et Verger, 1964 ; Hole, 1981 ; Lavelle et al., 1997; Folgarait, 1998 ; Dostál et al., 2005 ; Domisch et al., 2008 ; Farji-Brener et Werenkraut, 2017 ;). Leur présence dans les parcelles agricoles indique de manière générale une zone de forte productivité.

L'ensemble de ces actions sont illustratifs de l'impact des activités biologiques sur les états de surface et le fonctionnement des sols. Elles se traduisent en général par une redistribution de la matière et l'édification des plages de fertilité dans les champs agricoles. Cette édification induit une hétérogénéité de surface positive en termes de fertilité des sols favorable à la production des cultures.

1.2.5. La couverture végétale

Le couvert végétal sahélien naturel est une steppe, c'est-à-dire une formation végétale constituée par un tapis d'herbacées prédominé par les espèces annuelles et un couvert ligneux très ouvert (Gillet, 1967 ; Houérou, 1995). Il est caractérisé par une grande variabilité spatiale et des fluctuations de cycles de production (Cissé, 2016) en lien avec la saisonnalité marquée (longue saison sèche vs. courte saison de pluies), les effets des périodes de sècheresse extrême et l'extension des surfaces agricoles et pastorales, autant de conditions défavorables au développement des herbacées pérennes. La nature du sol et la topographie, constituent d'autres facteurs qui influencent le couvert végétal en zone sahélienne (Ambouta, 1994). Ces facteurs agissent à travers leurs actions sur la régulation de la quantité d'eau. Ainsi le couvert végétal est dense dans les dépressions, qui collectent l'eau de ruissellement, et aussi sur les substrats sableux d'origine éolienne favorables à l'infiltration et la reconstitution de la réserve hydrique du sol. Au contraire, le couvert végétal en zone sahélienne est relativement faible et clairsemé sur les substrats latéritiques portant des sols de faible profondeur. De nombreuses études font état d'une dégradation du couvert végétal en zone sahélienne sous l'influence de la pression démographique, les variations de la pluviométrie et les pratiques culturales inappropriées (Ozer et Ozer, 2005 ; Anthelme et al., 2006 ; Mahamane et al., 2007 ; Boubacar et al., 2013 ; Kadeba et al., 2014 ; Ozer et al., 2010). Cette dégradation se traduit au niveau des sols par un accroissement de leur fragilité, la perte de fertilité, une réduction de la biodiversité et la diminution globale des rendements de culture (Ozer et al., 2010). D'autres travaux néanmoins font état d'une régénération du couvert végétal au Sahel (Rasmussen et al., 2001; Herrmann et al., 2005 ; Prince et al., 2007; Bégué et al., 2011 ; Baggnian et al., 2014 ; Ouattara et al., 2015). Celle-ci est généralement liée à la dynamique naturelle de la végétation en lien avec le rétablissement des pluies qui a suivi les crises majeures de sécheresse (Herrmann et al., 2005). Des pratiques de gestion des ressources naturelles basées sur le reboisement et l'agroforesterie[1] sont également mises en avant comme facteur de régénération de la

[1] Selon la définition fournie par le Centre International pour la Recherche en Agroforesterie (ICRAF), l'agroforesterie est un système dynamique de gestion des ressources naturelles reposant sur des fondements écologiques qui intègrent des arbres dans les exploitations agricoles et le paysage rural et permet ainsi de diversifier et de maintenir la production afin d'améliorer les conditions sociales, économiques et environnementales de l'ensemble des utilisateurs de la terre.

couverture végétale dans certaines zones sahéliennes (Figure 11) (Breman et Kessler, 1997 ; Cunningham et Abasse, 2005 ; Reij et al., 2009). C'est le cas de la région sud-est du Niger où on assiste à une régénération de la couverture végétale consécutive à la mise en place d'une stratégie de gestion durable des arbres et des arbustes dans les champs. Cette stratégie dénommée Régénération Naturelle Assistée (RNA) consiste en l'identification, la matérialisation et la protection des jeunes sauvageons (Samaké et al., 2011). Elle constitue une alternative à la pauvreté de sol et l'amélioration de la production des cultures (Larwanou, 2006a, 2006b ; Boubacar, 2006 ; Gonda, 2010 ; Manssour *et al.*, 2014 ; Baggnian, 2014 ; Dan Lamso et al., 2015 ; Breman et Kessler, 1997 ; Jose, 2009). Des résultats significatifs relatifs à l'accroissement de la fertilité du sol et la production des cultures ont été obtenus à travers l'intégration des pratiques agroforestières basées sur certaines espèces végétales sahéliennes, notamment *Accacia senegalensis, Faidherbia Albida, Piliotigma reticulatum, Guiera senegalensis, Hyphaene Thebaica,* etc. (Libert et Eyog Matig, 1992 ; Dominique et al., 1992 ; Olivier et al.,1993 ; Louppe et al., 1996 ; Boffa, 2000 ; Wezel et al., 2000 ; Serpantié et Ouattara, 2001 ; Hien, 2002 ; Diedou et al., 2009 ; Yelemou et al., 2013,2014 ; Manssour et al., 2013, 2014 ; Ouédraogo, 2014 ; Dan Lamso et al., 2015a.b). Le développement naturel ou assisté de ces différentes espèces s'est traduit par l'amélioration de la structure, de l'état hydrique et du statut organique du sol, par conséquent à la protection du sol et l'accroissement de sa capacité de production (Roose et al., 1992 ; Manssour et al., 2013, 2014). Les surfaces occupées par des plantes agroforestières constituent des îlots de fertilité dans les champs. Wezel et al. (2000) en étudiant l'influence des arbustes sur les caractéristiques du sol et leur fonction dans les agroécosystèmes sahéliens, trouvent des concentrations en C, N, P de 38 à 51% et en K^+ à 22% plus élevées dans les sols autour des arbustes par rapport aux surfaces nues. L'accroissement des teneurs en bases échangeables est observé au niveau des sols autour de l'arbuste par rapport aux surfaces nues. Des concentrations élevées en Al^{3+} (44 %) et H^+ (55 %) ont été observées au niveau des surfaces autour de *Guiera senegalensis* avec une légère variation de pH (Wezel et *al.,* 2000). Les travaux de Dachung *et al.,* (2014) indiquent également un abaissement du pH du sol sous le couvert des plantes agroforestières.

Une augmentation des rendements en grains et en pailles du mil sous influence de *Guiera senegalensis* respectivement de l'ordre de 50 à 100% et de 10 à 25 % a été trouvée par Dan Lamso et al. (2015b). Les travaux de Dan Lamso et al (2015c) ont montré que la culture du mil au niveau des sols autour des touffes de *Hyphaene thebaica* entraine une augmentation de la production 1300 à 1820 $kg.ha^{-1}$ et 4630 à 6740 $kg.ha^{-1}$ respectivement pour les grains et les pailles par rapport aux surfaces témoins (440 $kg.ha^{-1}$ pour les grains et 2000 $kg.ha^{-1}$ pour les pailles).

Qu'il soit arboré ou herbacé, le couvert végétal constitue un des facteurs conditionnels essentiels de l'évolution de l'état de surface en zone sahélienne (Casenave et Valentin, 1989). Il agit sur l'action de l'eau de pluie en interceptant les gouttes et en dissipant leur énergie cinétique. Il modifie le régime du ruissellement et du vent en opposant un obstacle à l'écoulement de l'eau et au mouvement de l'air et leurs actions sur le transport et le dépôt de particules (Zomboudré, 2009 ; Dan Lamso et al., 2015ab). Sa régénération à travers des processus naturels ou des pratiques assistées favorisent la reconstitution des écosystèmes dégradés, accroissent la fertilité du sol et la production des cultures en zone sahélienne.

Figure 11: Arbre agroforestier dans un champ (a) et arbuste ayant fait de RNA au Niger

1.2.6. Les aménagements et pratiques culturales

Les aménagements et pratiques culturales visés ici sont ceux mis en place pour la gestion de la fertilité des sols en milieu paysan auxquels s'ajoutent diverses stratégies pour accroître le rendement, faire face à la dégradation par la voie de la réhabilitation ou s'adapter aux effets du changement climatique.

Les paysans sahéliens font recours à des stratégies traditionnelles pour reconstituer ou maintenir la fertilité de leurs sols. L'apport des résidus organiques d'origine animale ou

végétale figure parmi les pratiques les plus répandues. Les résidus organiques d'origine animale sont apportés par la voie de l'épandage des fumures animales transportés jusqu'aux champs ou par le parcage et la divagation des animaux dans les champs (De Rouw, 1998). Le parcage extensif ou mobile des animaux est le mode d'apport le plus répandu, pratiqué aussi bien par les éleveurs-agriculteurs et les agriculteurs sédentaires par la voie des contrats de parcage avec les propriétaires des animaux (De Rouw, 1998). Les apports de matière organique d'origine végétale sont issus de l'abandon des résidus de cultures ou l'apport de paille. Ils sont appliqués sous la forme de mulch, c'est-à-dire le recouvrement de la surface du sol avec de la matière végétale morte, ou enfoui dans l'horizon travaillé (Sedogo, 1993 ; Gigou et al., 2006 ; Vall et al., 2012). Le zaï est une technique traditionnelle appliquée au Burkina Faso, mais également connu sous le nom de tassa par les paysans du Niger. Il consiste à creuser un trou et à déposer une certaine quantité de matière organique animale ou végétale. Ces différentes pratiques permettent d'atténuer les impacts de gouttes de pluie. Elle favorise les activités de termites avec des effets notoires sur l'incorporation de la matière organique, l'amélioration de la structure de l'infiltration, ainsi que la réduction du ruissellement et des pertes d'eau par évaporation. Elles limitent les impacts de la mise en culture en particulier, les pertes en matière organique souligné par les travaux de Hien et al., (2003), la formation des croûtes superficielles (Albergel et al., 1991 ; Séguis et al., 2004 ; Leblanc et al., 2008 ; Bouzou Moussa et al., 2009 ; Descroix et al., 2011 ; Souley Yero, 2012) et l'élimination des éléments fins par lessivage et érosion hydrique et/ou éolienne (Ambouta et al., 1996 ; Valentin et al., 2004 ; Malam Abdou, 2014 ; Malam Abdou et al., 2015 et 2016).

La régénération de la fertilité des sols par les pratiques traditionnelles repose également sur la mise en jachère des champs entre deux périodes de culture. Le recours à cette pratique est actuellement de plus en plus rare en lien avec la pression foncière et l'accroissement démographique. On assiste à une extension des surfaces cultivées suivie d'un raccourcissement de la durée des jachères voire un abandon pur et simple de cette pratique traditionnelle.

Les encroutements superficiels qui se manifestent le plus souvent à travers des plages de croûte d'érosion, constituent des îlots d'infertilité dans les parcelles. Les différents modes d'utilisation des terres affectent les nutriments du sol et entraînent des changements

des propriétés du sol et de la productivité des terres (Islam et al., 2000 ; Wang et al., 2007 ; Li et al., 2011).

Le ramassage et l'abandon des résidus de cultures dans les champs, les aménagements simples de surface, le pâturage renforcent l'hétérogénéité dans les champs. La dynamique de la matière organique, de nature très hétérogène dans les sols (Nacro, 1999) et la fertilité des sols sont dépendantes de la mise en culture et des pratiques culturales (Hien, 2004).

L'hétérogénéité de surface du sol en lien avec les aménagements et pratiques culturales résident dans :

- ☞ Le transfert de fertilité opéré à travers l'apport de la matière organique d'origine animale, notamment le parcage, le transport…
- ☞ . Ces derniers expliquent la variabilité spatiale de la croissance des cultures en termes de différences dans les types de sols, de fertilité et de dégradation des sols, ainsi que leurs pratiques de culture et de gestion du sol (Lamers et Feil, 1995).

1.3. Conclusion partielle

Ce chapitre a montré différentes formes et facteurs qui gouvernent l'hétérogénéité de surface en zone sahélienne. L'hétérogénéité de la surface du sol en zone sahélienne se traduit 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. 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. 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. 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. La variabilité de surface influe sur le fonctionnement, l'état de fertilité, la qualité physique et chimique du sol et, par conséquent, entraine une forte variabilité spatiale de la production des cultures.

Chapitre 2 : Monographie du niébé

Ce chapitre apporte des informations sur la culture du niébé. Par une monographie, il aborde les exigences pédoclimatiques, son interêt écologique dans les agrosystèmes saheliens et situe son importance économique en Afrique et au Niger en particulier.

2.1. Classification, origine et aire de répartition

La taxonomie de *Vigna Unguiculata* L. Walp, connu en général sous l'appellation niébé en français et cowpea en anglais (Toudou, 1986 ; Karimoune, 2010), se présente comme suit, selon la classification de Verdcourt (1970) cité par Doumma (2011) :

Classe : Dicotylédone

Ordre : Fabales

Famille : Fabaceae

Sous-famille : Faboïdeae

Tribu : Phaseoleae

Sous-tribu : Phaseolinae

Genre : Vigna

Espèce : *Unguiculata*

Figure 12: Photo d'un pied de niébé cultivé à Tarna, région de Maradi

Cette plante serait domestiquée à partir du complexe des sous-espèces *mensensis* et *dekindtiana* en Afrique de l'Ouest (Doumma, 2011). Elle est cultivée et consommée principalement en Afrique de l'Ouest (Alzouma, 1987) et sur tous les continents (Asie, Amérique du Sud et du Centre, Caraïbes, Etats-Unis, Moyen Orient et Europe australe, etc.).

2.2. La plante et son cycle biologique

Le niébé est une plante annuelle, herbacée et autogame. Toutefois, il présente un taux d'allogamie variant entre 0,2 et 2 % favorisé par les abeilles qui assurent la pollinisation (Doumma, 2011). Le niébé est une espèce diploïde avec 2n = 22 chromosomes de petite taille comme chez la plupart des espèces de la famille des Phaseoleae (Charrier *et al.,* 1997). La germination du niébé est épigée. Les réserves contenues dans les cotylédons s'amenuisent au fur et à mesure qu'elles assurent une croissance vigoureuse à la plantule. Le système racinaire est composé d'une racine principale pivotante et des racines secondaires

portant des nodosités fixatrices d'azote. La tige du niébé est cylindrique, volubile, quelque fois glabre et creuse. Elle définit le port de la plante qui peut être érigé, semi érigé, buissonnant, ou rampant. Chaque nœud de la tige porte deux stipules et trois bourgeons axillaires (Sawadogo, 2009). Les feuilles sont alternes, trifoliées, avec une foliole terminale et deux folioles asymétriques. La forme peut être globuleuse à effilée avec beaucoup de types intermédiaires (Karimoune, 2010). Selon (Mifouna, 1999), les fleurs sont de grande taille et les inflorescences en grappe, sont axillaires et portent 2 à 4 fleurs de couleur blanche, quelque fois jaunâtre ou violette. La déhiscence des anthères se produit plusieurs heures avant l'ouverture de la fleur alors que le stigmate est réceptif deux jours auparavant. Les fruits aériens sont des gousses allongées comportant plusieurs graines ovoïdes ou arrondies.

Dans les zones sahéliennes, les semis sont réalisés au début de la saison des pluies (entre Juin et Juillet). La floraison commence en général deux mois plus tard (Août) et peut se poursuivre jusqu'à la fin de la saison des pluies sur certains pieds (Figure 12). La fructification caractérisée par l'apparition de gousses débute peu de temps après la floraison. La gousse de niébé comporte 8 à 20 graines ovoïdes, réniformes, lisses ou ridées. Les caractéristiques des graines et des gousses chez les formes cultivées constituent des critères de description des cultivars et d'identification des cultigroupes (Doumma, 2011). La récolte des gousses est réalisée de fin Octobre au début Novembre une fois la majorité des gousses devenues sèches. Les graines et les gousses sont ensuite stockées dans des greniers traditionnels constitués en banco (construction à base d'argile) ou en paille de mil. L'exemple d'un grenier en banco est illustré à la figure 13.

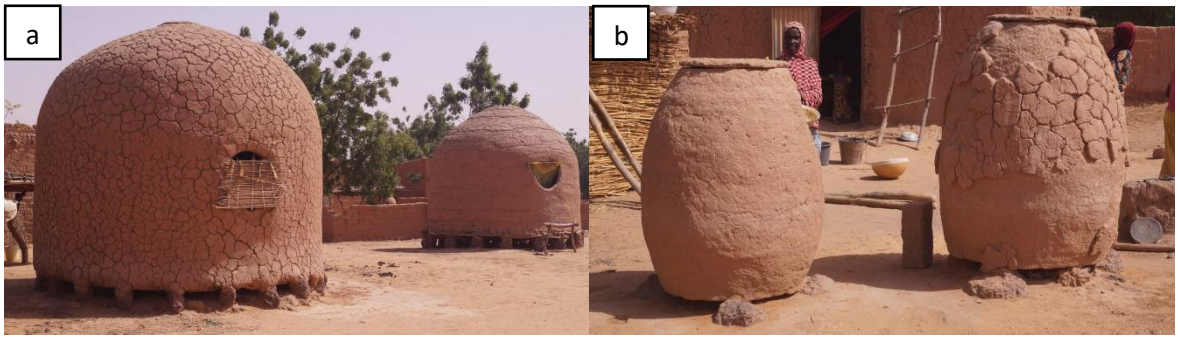


Figure 13: Greniers de stockage en banco du niébé (a) gousses et (b) grains

2.3. Exigence agro-climatiques

Le niébé est une culture très bien adaptée aux régions arides et semi-arides. Il est cultivé en conditions pluviales ou sous irrigation. Il peut être cultivé avec l'humidité résiduelle du sol le long des fleuves, ou dans les plaines lacustres en saison sèche, pourvu que les minima et maxima de température (nocturnes et diurnes) soient dans une fourchette de 28 à 30°C pendant la campagne culturale (Sani Issa, 2015).

Le niébé affiche une bonne performance dans les zones agro-écologiques où la pluviométrie est de 500 à 1200 mm/an (Dugje et *al*., 2009). Il est cultivé sur des sols très divers, sableux à légèrement argileux, sableux limoneux mais préférant néanmoins les sols légers et bien drainés (Bal *et al,* 2003) dont le pH se situe de préférence entre 5,5 à 6,5 (Toudou, 1986). Toutefois, un excès ou un déficit en eau peut avoir un impact négatif tant sur le développement que sur le rendement à la récolte. Une forte humidité est néfaste pour le niébé lié au risque des maladies (Toudou, 1986).

Le niébé est une plante de pleine lumière. On distingue 3 groupes de variétés en fonction de leur sensibilité ou non à la photopériode (Doumma, 2011) :

1. les variétés insensibles tardives ayant une croissance indéterminée et une floraison échelonnée ;
2. les variétés insensibles précoces à port érigé, à floraison et maturation groupées ;
3. les variétés photosensibles de jours courts (c'est-à-dire lorsque leur floraison se produit quand la longueur du jour décroît au-dessous d'un certain seuil) à croissance indéterminée et à port généralement rampant.

2.4. Intérêts de la culture du Niébé en zone sahélienne

2.4.1. Intérêt écologique de la culture du niébé

L'intérêt écologique de la culture du niébé réside tout d'abord dans sa capacité de fixation de l'azote atmosphérique en tant que légumineuse. Cette culture modifie certaines propriétés chimiques des sols comme le pH (Aïhou et Adomou, 1999, cité par Amadji et Aholoukpe, 2008) et assure une protection physique contre l'érosion hydrique et la perte

d'eau par évaporation. Ce rôle de protection physique se révèle important, en particulier chez les variétés rampantes ayant une croissance rapide et une capacité de recouvrement de la surface du sol (Dabat *et al.,* 2012).

La fixation de l'azote atmosphérique chez le niébé se fait à travers la relation symbiotique entre les racines de la plante et des bactéries fixatrices d'azote appartenant à la famille des Rhizobium. Son siège se trouve dans les nodosités ou nodules qui se forment suivant 4 étapes essentielles, à savoir l'infection, l'initiation, la maturation et la sénescence (figure 14).

L'infection se déroule dans un premier temps par le phénomène de reconnaissance mutuelle des symbiotes : c'est la phase initiale de l'infection (Halidou Oumarou, 2012). Les racines des légumineuses sécrètent des flavonoïdes ou des chémoattracteurs qui induisent l'expression des gènes Nod chez les Rhizobia spp (Halidou Oumarou). La présence des facteurs Nod induit la déformation des poils absorbants. Leur structure assure la liaison du Rhizobium à des récepteurs membranaires glycoprotéiques répartis à la pointe des poils absorbants. Selon le même auteur, les glycoprotéines, en particulier les lectines émises, pourraient jouer le rôle de liaison entre ces récepteurs et le facteur Nod qui serait enchâssé dans la paroi bactérienne. Lorsque le facteur Nod n'est pas bien reconnu par par les recepteurs membranaires, l'infection échoue.

A la maturité, la plante hôte (la légumineuse) procure à la bactérie des substrats carbonés provenant de la photosynthèse. En retour, la bactérie fixe l'azote atmosphérique (N2) sous une forme assimilable (NH3) par la plante hôte (Dommergues et *al*., 1999). A la sénescence, les nodosités libèrent les bactéries dans le sol, avec un nombre réduit de Rhizobia. Les bactéries ne sont pas capables de se multiplier en dehors des nodosités (Sahouré P, 2010). Ce mécanisme de fixation de l'azote atmosphérique fonctionne grâce à un complexe enzymatique appelé nitrogénase. Il implique la réduction de l'azote en présence d'ATP et d'un donneur d'électron (Dommergues *et al.*, 1999) et la production de l'ammoniac utilisable par la plante pour la synthèse des acides aminés et sa réduction à l'intérieur des nodosités (Dixon et Wheeler, 1986). Le mécanisme de fixation de l'azote est régi par l'équation suivante :

$$N2 + 6H^{+} + 6\,e^{-} \rightarrow 2NH3$$

La leghémoglobine, molécule fixatrice d'oxygène chez les légumineuses, contrôle le taux d'oxygène dont les teneurs élevées inhibent la nitrogénase et par conséquent la fixation de l'azote.

Figure 14: nodules formés dans les racines de niébé.

Des nombreuses études ont montré qu'à travers cette symbiose, le niébé couvre une grande partie de ses besoins en azote et améliore la fertilité des sols (Bationo, 2000 ; Bado, 2002 ; Fening et Danso, 2002 ; Diop et *al.,* 2013 ; Aboubacar et *al.,* 2013). Les travaux de Dakora et Keya (1997) ont montré une capacité de fixation de 15 à 210 kg d'azote par saison. D'après Quin (1997), un hectare de niébé rapporte 40-80 Kg d'azote dans le sol. D'après Bado, (2001) la quantité d'azote fixée par le niébé est comprise entre 50 à 115 kg N ha-1, soit 52 à 56 % des besoins de cette plante en azote (Bado, 2001). Des valeurs de fixation atteignant 89 % du besoin de la plante ont été mesurées en zone tropicale (Peoples et *al*., 1995). 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 (Bado, 2000 ; Bagayoko *et al.,* 2000 ; Djenontin *et al.*, 2003 ; Bado *et al.,* 2006 ; Coulibaly *et al.,* 2017). Une augmentation de 20 à 25 % de l'azote minéral suivie d'une amélioration de la nutrition azotée et des rendements des céréales ont été observées dans les rotations culturales comportant le niébé (Bado,

2001). Une culture de sorgho succédant à une culture de niébé pourrait prélever 2 à 3 fois plus d'azote et 2 fois plus de P et le rendement augmenteraient de 300 % (Bado, 2001). Cela équivaut à une application de 25 Kg ha^{-1} d'azote minéral. L'apport en azote mesuré dans une rotation niébé-mil est de 30 kg/ha (Bationo, 2000).

La capacité de fixation symbiotique de l'azote par les légumineuses peut être améliorée en inoculant le sol avec des souches performantes de Rhizobia ou par michorization avec des champignons. Au Brésil par exemple, Martins et *al*. (2003) ont conduit des recherches sur l'inoculation du niébé par des bactéries de la famille des *Rhizobiacées* (notamment la souche BR 3267). Ils ont montré que la productivité en grain du niébé inoculé par cette souche est similaire aux plantes qui reçoivent 50 kg de N par hectare, ce qui est la quantité d'engrais utilisée dans la région Nord-Est du Brésil. Diop *et al*. (2013) ont travaillé sur l'inoculation endomycorhizienne du niébé avec *Rhizophagus irregularis*. Ils ont montré que l'association des racines du niébé avec ce champignon augmente le taux d'azote de 33,3% dans la rhizosphère des plantes inoculées. Aboubacar *et al.* (2013) ont réalisé des études pour mettre en évidence l'effet de la co-inoculation du rhizobium et de mycorhizes sur les performances agronomiques du niébé au Niger. Ils ont conclu que l'inoculation combinée (Rhizobium + champignons mycorhiziens) entraîne une améliore de 32% le rendement en gousses de niébé par rapport au témoin sans traitement (165,35 kg ha^{-1} pour le Témoin et 217,88 kg ha^{-1} avec le traitement).

2.4.2. Intérêt économique et rôle dans la sécurité alimentaire

Le niébé est une des principales légumineuses alimentaires mondiales majoritairement produites en Afrique : plus de 4,5 millions de tonne de graines sèches sont produites dans le monde dont plus de 87 % en Afrique (Langyintuo et al., 2003 ; FAOSTAT, 2004 ; Nkouannessi, 2005 ; Folefack et al., 2013). Les principaux pays producteurs de cette légumineuse sont situés en Afrique occidentale (principalement Nigéria, Niger, Mali, Burkina Faso, Sénégal) où environ 9,3 millions d'hectare de culture son annuellement réalisés.

Le Niger se classe deuxième parmi par les principaux pays producteurs de niébé en Afrique de l'Ouest (Tableau 1 ; PRODEX, 2007).

Tableau 1: Classement des principaux pays producteurs du niébé en 2007. (PRODEX, 2010)

Pays	Productions en milliers de tonnes
Nigeria	2800
Niger	1001
Burkina Faso	253
Ghana	235
Sénégal	60
Mali	58

Chaque année plus de 5 millions d'hectares sont emblavés avec du niébé et permettent la production de 1,5 million de tonnes soit le quart de la production agricole nationale et 80% des cultures de rente (Diallo et al., 2012 ; Kadri et al., 2013). Selon le CESAO (2006), le niébé représente le 3ème produit d'exportation du Niger après l'uranium et les produits d'élevage. Le niébé occupe la troisième culture pluviale après le mil et le sorgho. En termes de superficie, il occupe la deuxième place. La figure 15 illustre les productions ainsi que les superficies emblavées de niébé de 1990 à 2009 au Niger. De l'analyse de cette figure, il ressort clairement que sa production a connu des augmentations spectaculaires puisqu'elle a plus que triplé entre 1990 et 2009 passant de 223.600 tonnes à 787.500 tonnes. Les superficies cultivées sont passées de 2.7 millions d'ha en 1990 à 4.2 millions d'ha en 2009.

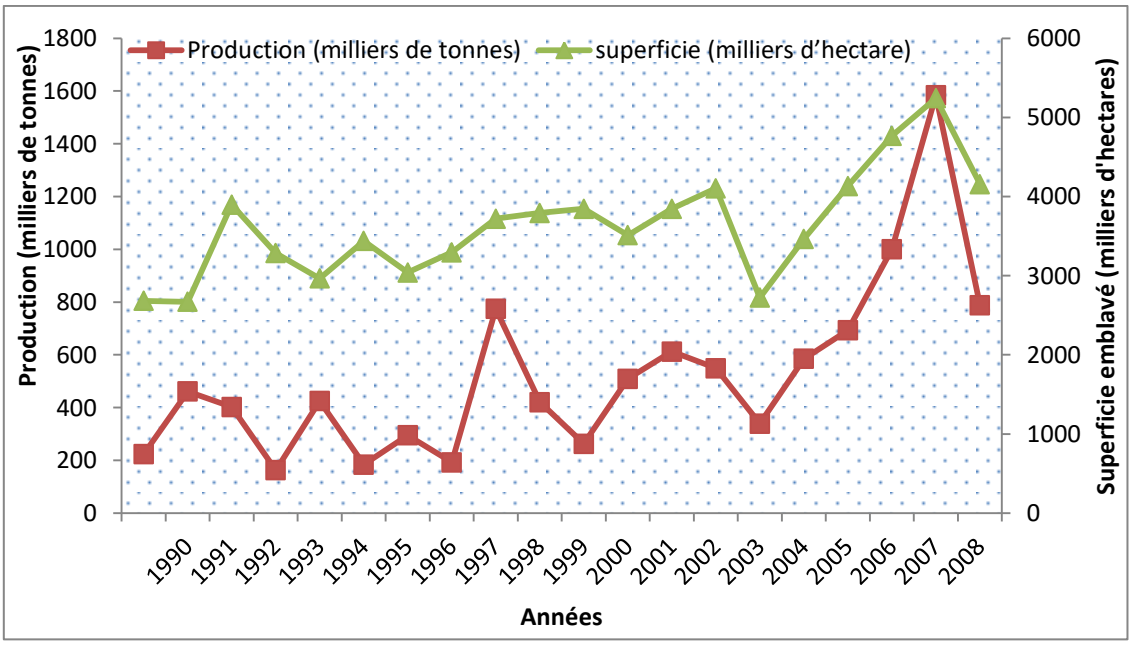


Figure 15: Evolution de la production et de la superficie emblavée en niébé au Niger entre 1990 et 2009

La figure 16 illustre les superficies cultivées et la production du niébé de 1990 à 2009 dans les régions de Maradi et de Tillabéri.

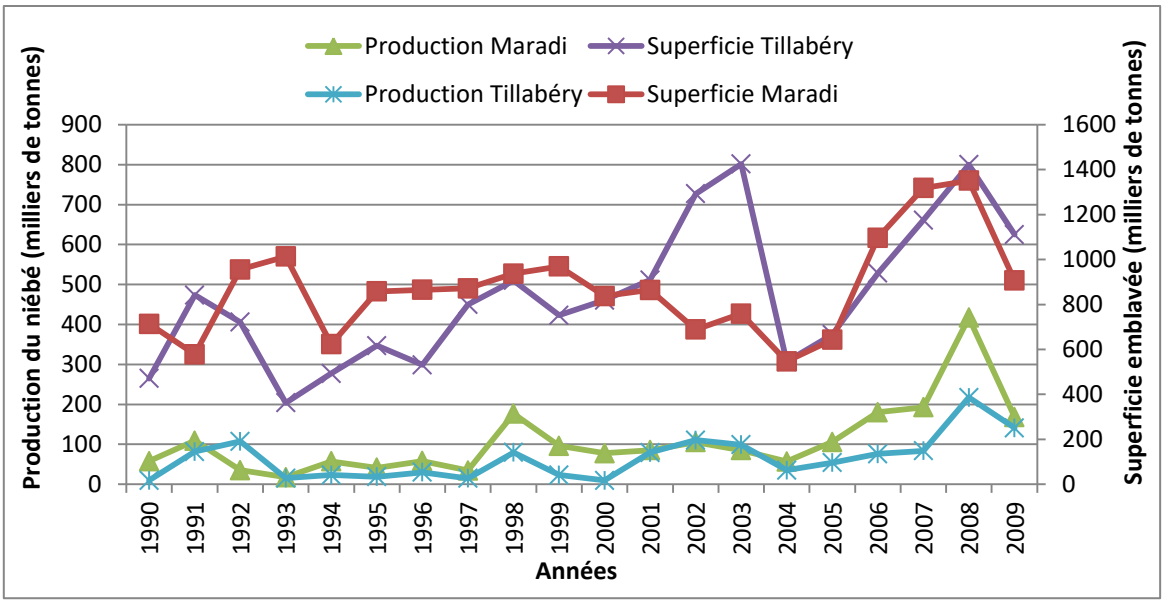


Figure 16: Evolution de la production et de la superficie emblavée en niébé dans les régions de Maradi et de Tillabéri entre 1990 et 2009

On constate que la production de niébé est plus importante dans la région de Maradi que celle de Tillabéri avec une moyenne de production sur 20 ans (période entre 1990 et 2009) estimée à 107900 tonnes dans la région de Maradi contre 65470 tonnes dans la région de Tillabéri. Les superficies emblavées sont également plus importantes à Maradi qu'à Tillabéri (870000ha pour Maradi et 473000ha pour Tillabéri). On remarque que les taux d'évolution de la production de niébé et des superficies emblavées à l'échelle régionale restent similaires à celle de l'échelle nationale.

L'amélioration de la production du niébé est essentiellement liée à l'extension des superficies cultivées. La pauvreté des paysans leur empêchant toute forme d'intensification, cette extension s'est faite sur des terres marginales et des jachères (Zoundi *et al.*, 2006). Ce type d'agriculture dite "minière" et "itinérante" épuise rapidement la capacité productive des terres et compromet dangereusement l'équilibre des écosystèmes (Zoundi *et al.*, 2006). Cependant on remarque que cette hausse de la production n'est pas toutefois proportionnelle aux superficies cultivées. Malam Abdou, (2015) rapporte que l'évolution non proportionnelle des rendements par rapport aux surfaces cultivées illustre la faible fertilité des sols et explique donc la recherche des terres fertiles.

L'inégalité dans la production du niébé entre ces deux régions pourrait surtout s'expliquer par le fait qu'à Tillabéri, sont regroupés des facteurs défavorables liés aux habitudes alimentaires, la culture du niébé étant réservée surtout aux femmes et la production des fanes semble être préférée à celles des graines pour le besoin surtout de l'lévage. Par contraste, dans la région de Maradi, outre l'importance alimentaire du niébé pour la population, les raisons économiques liées à sa commercialisation avec le Nigeria expliquent sa culture sur presque toutes les superficies cultivables.

2.5. Conclusion partielle

Le niébé est la principale légumineuse cultivée au Niger. Cette culture est surtout pratiquée à cause de son rôle alimentaire, socio-économique et environnemental mais également son adaptation à la pauvreté des sols. L'importance de cette culture varie entre les régions de Tillabéri et de Maradi : les deux principales zones géographiques de cette étude. Sa production est plus importante dans la région de Maradi que dans la région de Tillabéri. Malgré l'engouement que suscite la culture de niébé, certaines contraintes pédologiques limitent sa production. La réponse du niébé vis-à-vis de l'hétérogénéité de surface du sol n'est pas à ce jour documenté.

Chapitre 3 : Présentation des sites et cadre de l'étude

3.1. Situation géographique

Cette étude a été réalisée dans deux régions du Niger offrant des conditions agro-écologiques, pédoclimatiques (climat, sols, pratiques culturales) et socio-économiques (utilisation et commercialisation) différentes vis-à-vis de la culture du niébé. Il s'agit :

- de la région de Maradi au Centre-Sud où deux sites expérimentaux représentatifs des grands types de sol ont été choisis Arraourayé dans la commune de Sharkin Haoussa et Tarna dans la comune de Safo (figure 17) et
- de la région de Tillabéri où deux sites representatifs d'un gradient pluvioémtrique Nord-Sud ont été choisis. Il s'agit du terroir de Banizoumbou dans la commune de Dantiandou et celui de Sadoré dans la commune de Youri (Figure 17).

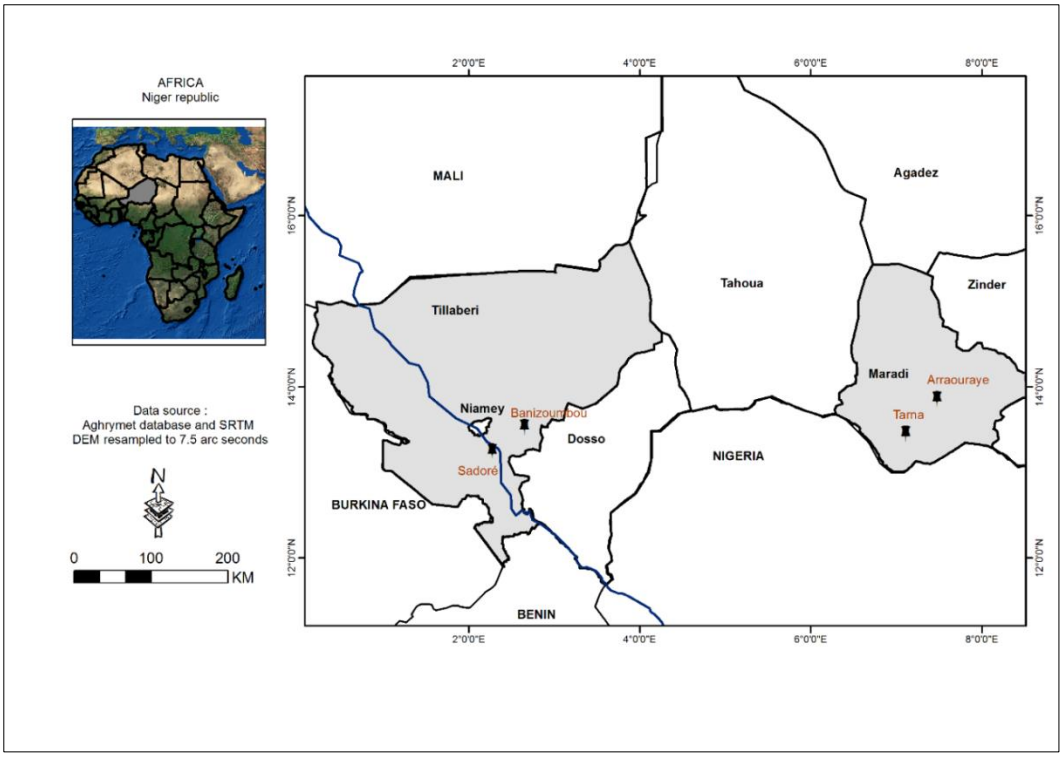


Figure 17: Carte de localisation des sites d'étude

3.2. Conditions climatiques

Les régions de Maradi et Tillabéri sont situées dans la bande sahélienne. C'est une zone de transition comprise entre la zone saharienne, sa limite nord marquée par l'isohyète 200 mm, et la zone soudanienne, sa limite sud marquée par l'isohyète 700 mm (Massuel 2005 ; figure 18). Les sites d'études sont situés entre les isohyètes 300 et 600 mm (figure 19).

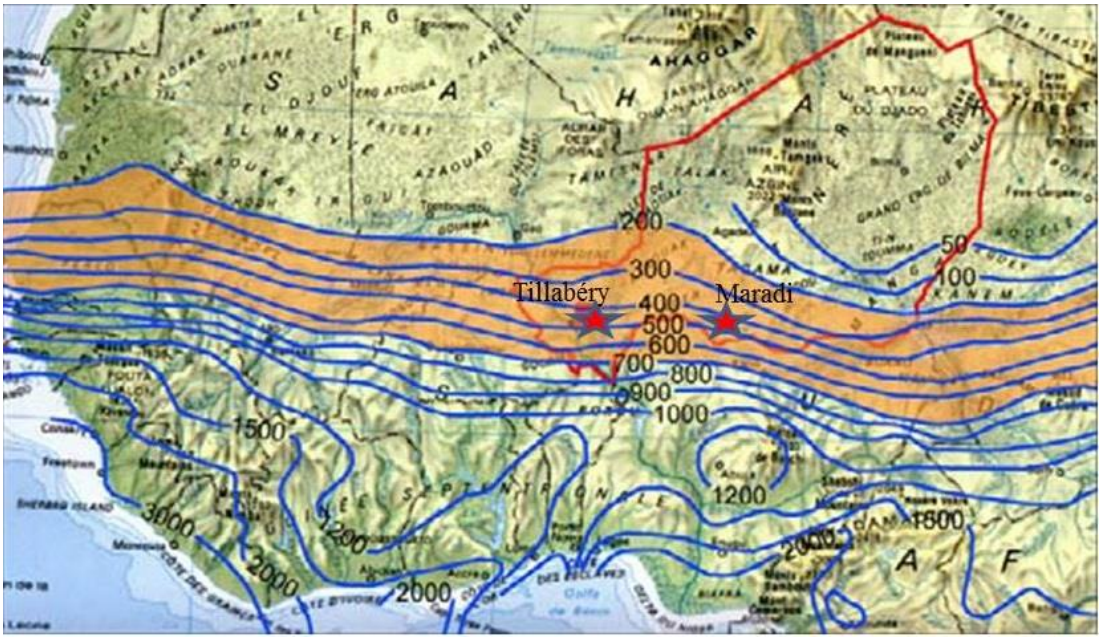


Figure 18: Carte des précipitations moyennes annuelles en Afrique de l'ouest (période 1951-1989), d'après L'Hôte et Mahe (1996). Les zones d'étude (étoiles) sont situées dans la bande sahélienne (entre les isohyètes 200 et 700 mm).

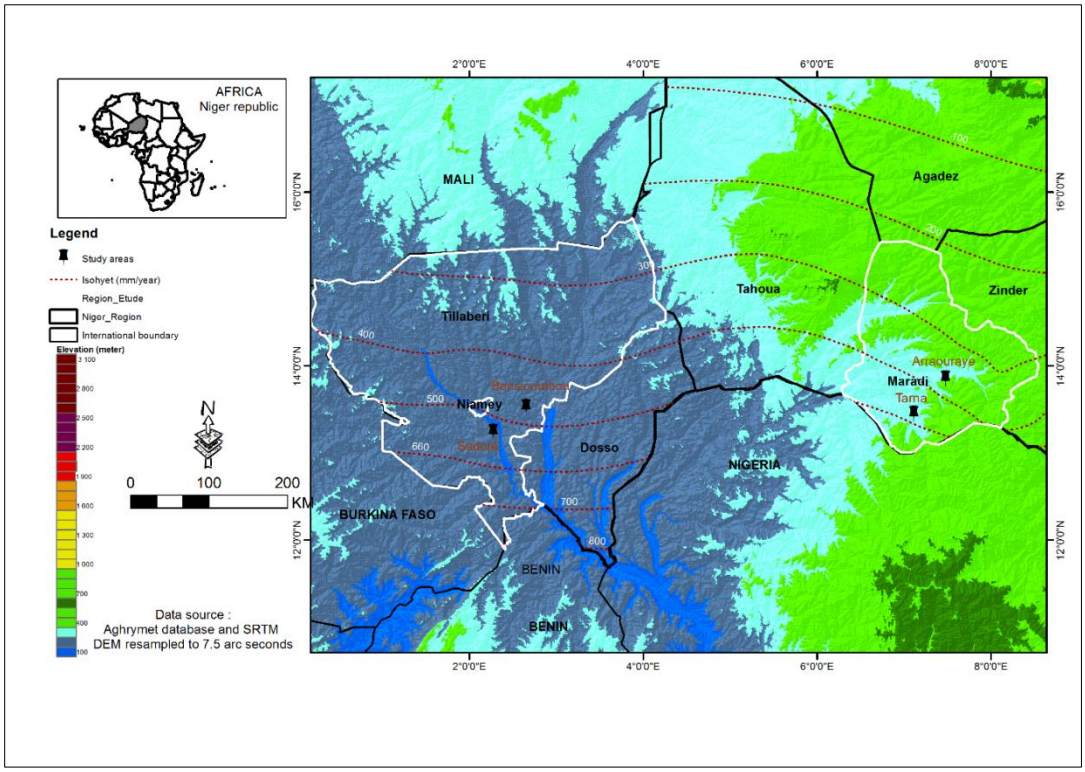


Figure 19: Carte illustrant les isohyètes entre les sites d'étude

Les précipitations moyennes annuelles enregistrées à la station de Maradi sont enregistrées à 490 mm durant la période 1962 à 2014. Celles enregistrées dans la région de Tillabéri sont de 562 mm (estimation faite à partir de la station la plus proche, celle de Niamey pour laquelle nous disposons des données complètes) durant la période 1960 à 2017. Ces moyennes connaissent des fortes variabilités interannuelles avec une alternance des périodes sèches (par exemple entre 1968 et 1976 ; 1980 et 1988) ; et humides bien marquées (par exemple entre 1960 et 1967, 1976 et 1980) (figure 20). Les déficits pluviométriques annuels observés depuis 1980 au Niger sont fortement lies à un déficit du nombre d'évènements naissants au cœur de la saison des pluies, et non à une diminution de la hauteur moyenne par évènement (Le Barbé et Lebel, 1997 ; Le Barbé *et al.,* 2002). Une tendance à l'augmentation de la pluie depuis le milieu des années 1990 est notée par Lebel et Ali (2009) au Sahel central et oriental à cause de la recrudescence des évènements pluvieux extrêmes et l'augmentation de l'intensité des précipitations (Sighomnou *et al.,* 2013).

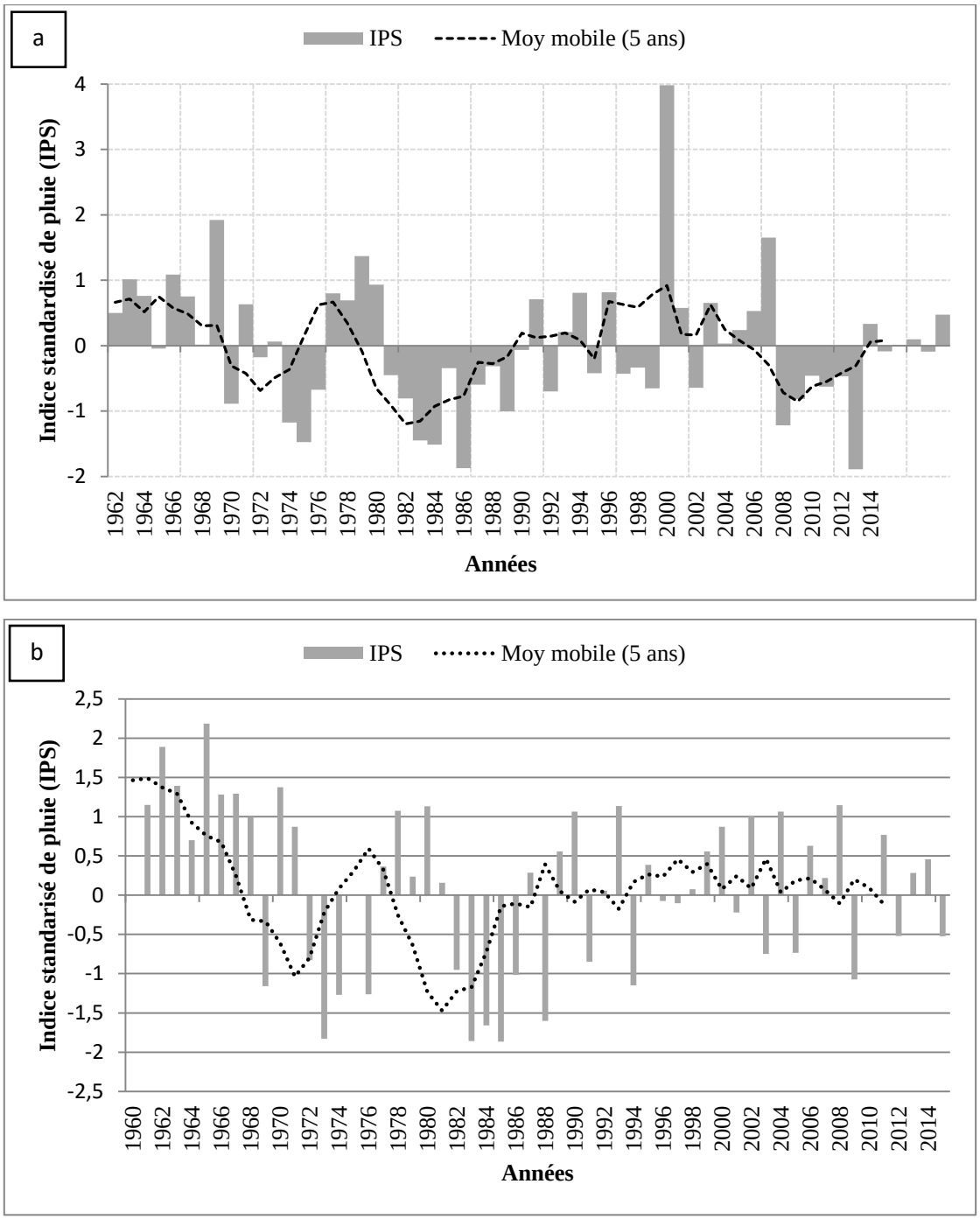


Figure 20: Évolution de la moyenne des cumuls annuels des pluies glissante et de l'indice de pluie standardisé (IPS) de la station de : (a) Niamey sur la période 1962-2014. Pmoy *(1960-2017) = 562 mm et σ = 130 mm.* ; (b) Maradi sur la période de 1960 et 2014. Pmoy *(1960-2017) = 490 mm et σ = 110 mm.* L'indice IPS est calculé selon la formule IPS = (Pi – Pmoy)/σ avec i indice de l'année. Données de la Direction de la météorologie Nationale du Niger

La moyenne de pluie annuelle sur le site de Banizoumbou, est de 472 mm de 2010 à 2016. Les températures moyennes journalières présentent un minimum de 24°C en décembre et janvier et un maximum de plus de 40°C en avril. La moyenne annuelle est de 30°C. L'évapotranspiration est de l'ordre de 2300 mm par an (Garba, 2007). L'humidité

relative connaît de grandes variations. Les valeurs minimales peuvent descendre à 5 % entre Mars et Mai et le pic hygrométrique est de 75 % entre le mois d'août et septembre (Weynants, Dutordoir, 2006).

La pluviométrie moyenne annuelle sur le site de Sadoré est de 549 mm entre 2010 et 2016. La température moyenne annuelle est de 29°C. Les valeurs maximales sont de l'ordre de 45°C. La période de décembre à janvier correspond à la saison froide avec les températures de l'ordre de 14 à 15°C (West et *al.,* 1984). L'évapotranspiration dans la zone est de 2500 mm/an et peut-être inférieure à la pluviométrie entre les mois de Juillet et Août (Leduc *et al.,* 2001). L'humidité relative est de l'ordre de 75 % (Abdoul Karim *et al.,* 2018).

Le site de Arraourayé a une pluviométrie moyenne annuelle de 450 mm. Dans cette zone, la température moyenne dépasse 40° C durant les mois de Mars à Mai (Bouzou et Yamba, 2008). Le maximum d'humidité relative est atteint au mois d'août et le minimum en février (Gonda, 2009).

Le site de Tarna a une pluviométrie annuelle de 500 mm entre 2010 et 2016. Les températures sont très variables d'une saison à l'autre. Les moyennes mensuelles varient entre 12 à 42 ° C (Maman et al., 2018). L'humidité moyenne minimale annuelle varie entre 21 à 40 % et les valeurs maximales peuvent atteindre 53 à 60 % au niveau de la station de l'aéroport de Maradi la plus proche du site (INS, 2010). Les données d'évapotranspiration recueillie à la station de l'aéroport de Maradi, indique une moyenne de 2125 mm/an entre 1984 et 2003.

3.3. Géologie, géomorphologie et pédologie

3.3.1. Le contexte géologique

Le contexte géologique des sites étudiés est caractérisé par deux grands ensembles (Figure 21): les formations du socle cristallin du Liptako Gourma sur lesquelles se trouve le site de Sadoré et les formations sédimentaires du bassin des Iullemmeden où se situent les sites de Banizoumbou, Arraourayé et Tarna.

- Les formations du socle cristallin du Liptako-Gourma sont une partie du grand craton ouest-africain qui affleurent sur la rive droite du fleuve Niger. Elles constituent un ensemble structural datant du Précambrien moyen (2300 à 1900 Ma), formé par des

ceintures de roches volcano-sédimentaires d'orientation NE-SW, séparées par des vastes batholites de granites, quartzites, et diorites quartzitiques (Machens, 1973). Ces formations sont parfois recouvertes par des séries sédimentaires du Continental Terminal (CT), datant de la fin du Tertiaire (Pliocène), qui reposent en discordance sur le socle. Des vestiges d'une série de couverture sédimentaire faiblement plissée et supposée d'âge Protérozoïque supérieur sont connus le long du fleuve Niger (Machens, 1973).

- Les formations sédimentaires du bassin des Iullemeden affleurent sur la rive gauche du fleuve Niger. L'histoire géologique de ce bassin est marquée par des transgressions marines intercalées par des épisodes continentaux du Paléozoïque jusqu'au Cénozoïque (Greigert et Pougnet, 1965). On note une progression des aires de sédimentation au cours des temps géologiques du Nord-est vers le Sud-ouest. Ainsi les formations les plus récentes datant du Tertiaire, notamment les niveaux les plus récents du CT (CT3), reposent directement sur le socle birrimien du Liptako dans la région de Tillabéri. Les formations du CT3 sont des sédiments détritiques à dominance argilo-gréseuse qui ont comblé le bassin des Iullemmeden sur une épaisseur de plus de 450 m (Killian, 1931 ; Greigert, 1966 ; Greigert et Pougnet, 1967). Elles regroupent toutes les séries continentales postérieures au Crétacé supérieures et antérieures au Quaternaire. Ces formations recouvrent l'Ouest du Niger, notamment le secteur du site de Banizoumbou.

  Les formations sédimentaires du bassin des Iullemeden dans la région de Maradi appartiennent aux séries du Continental Intercalaire (ou Hamadien). Elles correspondent à l'ensemble des formations détritiques postérieures aux derniers dépôts marins du Primaire (Carbonifère) et antérieures à la première transgression marine du Secondaire (Cénomanien supérieur) (Greigert, 1966 ; Greigert et Pougnet, 1967). Elles sont recouvertes dans la zone de Arrourayé (département de Mayahi, région de Maradi) par un vaste plateau légèrement ondulé d'erg d'une altitude moyenne de 380 m qui domine la dépression de la vallée de Goulbi N'kaba actuellement classée parmi les vallées fossile du Niger (Banoin et *al.,* 1996). Dans la zone de Tarna (département de Madarounfa, région de Maradi) les formations du continental hamadien sont recouvertes par les ergs de forme aplanie, marqués par

des glacis d'épandage sableux, des plateaux dunaires et par la grande dépression de la vallée du Goulbi de Maradi dont l'écoulement s'observe durant la période d'hivernage (SRAT, 2008). Le bassin versant de la vallée de Goulbi Maradi est situé à la limite orientale du bassin sédimentaire d'Iulliminden (Issiaka *et al.,* 2012).

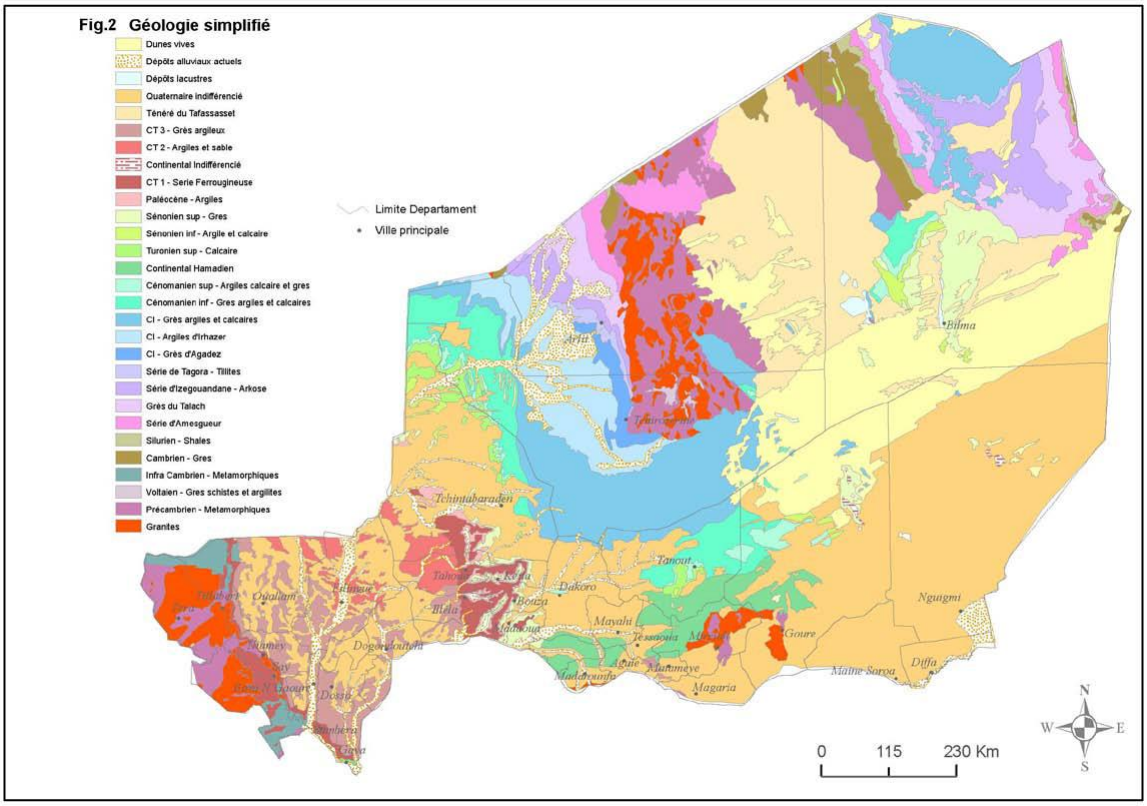


Figure 21: Formations géologiques des zones d'étude (Modifié d'après Greigert & Pougnet, 1967, UNICEF)

3.3.2. Le contexte pédologique et géomorphologique

☞ ***La région de Tillabéri :***

Les sols dans cette région sont en général des sols ferrugineux tropicaux classés dans les Arénosols Ferraliques (IUSS Working Group WRB, 2015 ; figure 22).

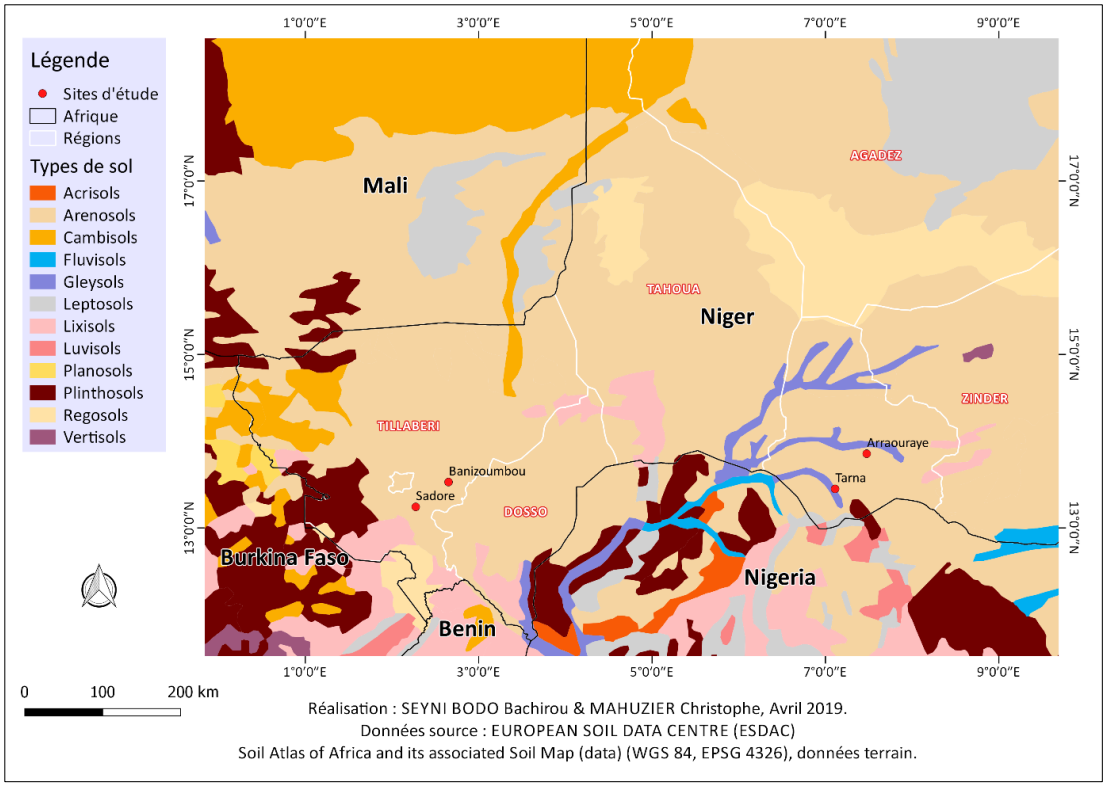


Figure 22: carte des sols des sites d'études

➢ Banizoumbou (commune de Dantiandou, région de Tillabéri)

Une toposéquence caractéristique du site de Banizoumbou montre les grands ensembles pédologiques suivants (Peugeot, 1995 ; Ambouta *et. al*., 1996 ; Massuel, 2005) :

- les Leptosols ou lithosols peu évolués à faciès ferrugineux. Ce sont des sols issus du démantèlement des cuirasses qui se développent sur les plateaux cuirassés et les versants. Ils sont qualifiés de sols reliques des plateaux. Ils sont peu épais (de 35 à 60 cm), très graveleux à partir de 20 centimètres de profondeur et relativement riches en argile de type kaolinite (15 à 45 %). Ce sont des sols sans valeur agricole et ils sont très sensibles à l'érosion hydrique. Leur dégradation se traduit par l'apparition d'éléments grossiers en surface (blocs, cailloux, graviers) ou par une fine pellicule plasmique imperméable appelée croûte d'érosion (Ambouta, 1997). On y trouve d'autres types de croûtes physiques, des croûtes biologiques, des plaquages et des dômes de termites. Des talus plus ou moins abrupts forment une zone de transition entre les versants sableux et les plateaux.

- les Arénosols Ferraliques ou sols ferrugineux tropicaux non ou peu lessivés. Ils se développent sur les jupes sableuses, des placages épais de sable rouge homogène, de pente faible (de 2 à 5 %), formant des larges auréoles à la base des plateaux. Ces sols sont relativement épais (plus de 2 m), à profil peu différencié caractérisé par des variations de couleur, de structure et de texture sableuse fine. Les horizons de surface, pauvres en matière organique (environ 0,5 %) et en argile (de 2 à 5 %), sont très sensibles à l'érosion hydrique et éolienne. Ces sols font actuellement l'objet d'une intense mise en culture. Elles sont assimilées à des glacis d'épandage sableux du fait des écoulements en nappe ou diffus qui s'y développent (Bouzou *et al*., 2011).
- les Arénosols Ferraliques ou sols ferrugineux tropicaux non ou peu lessivés fortement remaniés en surface, se trouvent aussi dans les fonds de vallées sèches. Ils constituent les vestiges de larges cours d'eau quaternaires ayant piégé des sables éoliens sous forme de puissants bombements sableux très réguliers et à faible pente (de 3 à 5 %). Dans cette unité de paysage, seuls les bombements sableux sont intensément cultivés. Ces sols sont semblables à ceux des jupes sableuses, ils sont cependant plus fortement remaniés en surface si bien qu'ils paraissent beaucoup plus clairs. Sur les bombements sableux et les jupes, une des formes de dégradation la plus spectaculaire de la surface des sols se manifeste par l'apparition de plages nues (loupes d'érosion) très caractéristiques. Mesurant environ de 2 à 10 mètres de diamètre, déprimées (à la manière d'une loupe) et souvent légèrement étirées dans le sens de la pente, ces plages sont colmatées par une pellicule plasmique luisante (croûte d'érosion) qui limite de manière considérable l'infiltration et augmente les risques de ruissellement et d'érosion. Sur les jachères, les loupes d'érosion sont souvent bordées d'épais bourrelets sableux fixés par la végétation herbacée.

➢ **Sadoré (Commune de Youri, région de Tillabéri)**

Une toposéquence réalisée dans la zone de Sadoré permet de distinguer les grands types de sols suivants :

- des Régosols qui couvrent la surface de plateaux et de plaine sableuses dédiés aux cultures pluviales représentant les limites Nord-ouest du terroir de Sadoré. Ces plateaux jadis boisés, ont subi une forte utilisation qui ont conduit à la formation des vastes surfaces encroûtées (Descroix *et al.,* 2012) et leurs

escarpements constituent les bassins versants dont les eaux de ruissellement sont drainées vers le fleuve avec la création de plusieurs ravinements et Koris (Le Breton, 2009). L'intensité de ces ruissellements favorise le transport des sables alluviaux, facteurs d'ensablement des sites maraîchers et du fleuve.

- Les Arénosols Ferraliques ou sols ferrugineux tropicaux des zones de glacis d'épandage. Ils sont sableux, acides rougeâtres pauvres en matière organique avec une faible capacité d'échange cationique (Bationo *et al.,* 1986 *in* Issaka, 2011). La teneur en sable dépasse généralement 85%, tous les horizons contiennent moins de 10% d'argile, certains en ont seulement 5% à 8%. Ces sols portent les cultures pluviales
- des sols hydromorphes dans la vallée du fleuve Niger situé à 7 km de Sadoré. Ce sont des sols qui sont très sensibles aux extrêmes climatiques à savoir la sécheresse et l'inondation. En effet lors d'une sécheresse, ces sols très compacts se craquelent et cassent les radicelles qui servent à l'alimentation de la plante. Pendant l'inondation, ces sols s'engorge d'eau entrainant ainsi une asphyxie des cultures (Abdou, 2015).

☞ ***la région de Maradi***

Les sols dans cette région se répartissent dans deux grands ensembles, à savoir les sols ferrugineux tropicaux à caractère dunaire (Arénosols Ferraliques) sur les plateaux sableux et les glacis et les alluviaux ou hydromorphes des Goulbi (Gleysols) dans les vallées. La classification des sols couramment utilisée par les études antérieures réalisées dans cette région se basent sur la teneur en terres fines, notamment les éléments fins (argile, limon) et la fraction sableuse (Le Gal, 1987 ; Ambouta, 1998 ; Issaka, 2001 ; Bouzou et Yamba, 2008). On distingue ainsi :

- Les sols sableux ou *Jigawa* selon la dénomination des paysans. Ils sont de loin les sols prédominants de la région. Ce sont des sols ferrugineux tropicaux lessivés (Arénosols Ferraliques), caractérisés au niveau de leur texture par un pourcentage de sable très élevé (96−98 %) et un taux d'argile très bas autour de 3 % (Issaka, 2001). Ils sont formés sur des sables éoliens de l'erg ancien. Les caractéristiques physicochimiques de ces sols démontrent qu'on a affaire à des sols pauvres en éléments nutritifs d'où

un problème de fertilité signalé d'ailleurs comme la contrainte majeure à la production agricole sur ces types de sol. On note tout de même que ces sols présentent une bonne perméabilité et on n'observe aucun phénomène de prise en masse. Ils sont de loin les sols préférés des paysans car ils sont faciles à travailler avec les instruments traditionnels par rapport aux sols lourds. Cependant malgré leur bonne perméabilité, ils sont sujets à l'érosion hydrique due à l'intensité des pluies. Le phénomène d'érosion éolienne ou hydrique présente une grande menace pour la perte de ces sols. On retrouve le *Jigawa* ou sols ferrugineux tropicaux lessivé (Arénosols Ferraliques) sur les sites de Arraourayé et Tarna.

- Les sols limono-sableux ou sablo-limoneux *ou gueza* selon l'appellation locale. Ils appartiennent également aux sols ferrugineux tropicaux lessivés (Arénosols Ferraliques) mais formés sur des placages sablo-argileux, ce qui leur confère une texture plus fine par rapport au Jigawa. Les proportions en argiles sur ces sols varient entre 6 et 8 %. Ces sols qualifiés aussi de *laka-laka* (un peu argileux) ou *tsaouri* (dur) ou encore *hako* (surface dure) ont été longtemps délaissés. Ils connaissent actuellement une mise en valeur en liaison avec la forte croissance démographique (Issaka, 2001). Les caractéristiques observées du *geza* sont celles du groupe des sols ferrugineux tropicaux lessivés. Les caractéristiques des sols de *jigawa* ne diffèrent que par le degré de lessivage des colloïdes minéraux notamment en argile de celles de *gueza* (Ambouta et *al*, 1998). Ce type de sol est surtout rencontré sur le site de Tarna ;
- Les sols de bas-fond ou « Fadama » en haoussa : ils sont localisés dans la vallée du Goulbi et dans les dépressions inter dunaires. Ces sols correspondent aux sols alluviaux ayant des teneurs en argiles variant de 12 à 15 %. Ils correspondent aux Gleysols hydromorphes. Ce sont des sols à hydromorphie temporaire formés d'alluvions argilo-sableux, à texture variable, et cohérents à sec. Ce sont des sols fertiles, où se pratiquent les cultures irriguées ou de décrue. Le comportement de ces sols vis à vis de l'eau n'est pas favorable au développement des plantes car ils ont une faible perméabilité entraînant du coup une perte de sol par ruissellement (Issaka, 2001). Les sols alluviaux du Goulbi sont rencontrés surtout sur le site de

Tarna. A Mayahi, département où se situe le site de Arraourayé, on rencontre ce type de sol dans le Goulbi N'Kaba mais à l'état fossile.

3.4. Végétation

- **Site de Banizoumbou**

La répartition de la végétation sur le site de Banizoumbou varie en fonction des unités morpho -pédologique (Peugeot, 1995 ; Massuel, 2003). On distinguera trois types de formation végétale :

- la "brousse tigrée" : ce sont des formations végétales des plateaux cuirassés. Elles se caractérisent par une disposition de la végétation en bandes. La partie amont de la bande végétale recueille en priorité le ruissellement. Ils s'y développent les plus grands individus de *Combretum micranthum*, *Boscia angustifolia*, *Acacia macrostachya* et *Acacia ataxancantha.* La partie aval de cette bande perd de l'eau au bénéficie de la bande adjacente, la population végétale dépérit. Ces formations végétales adoptent donc des formes contractées et sont en renouvellement ainsi qu'en mouvement continu.
- Les formations végétales des jupes ou versants sableux. Elles sont majoritairement constituées par *Guiera senegalensis qui se développe* dans les champs cultivés, les jachères et les parcours (lieu de pâturage). Cette population arbustive cohabite avec des arbres, tels que *Balanites aegyptiaca* ou *Faidherbia albida* et une strate herbacée constituée par des graminées (*Aristida mutabilis*, *Zornia glochidiata*, *Mitracarpus scaber* et *Cenchrus biflorus).*
- Les formations végétales des bas-fonds. On distinguera la végétation des sols hydromorphes organisée en fourrés denses. Cette végétation est typique des zones où l'engorgement n'est pas trop prononcé. Elle est constituée par *Acacia nilotica*, *Acacia seyal*, landes à buissons de *Bergia suffruticosa*, *Bauhinia rufescens* et *Piliostigma reticulatum*. La végétation des sols non hydromorphe se caractérise par la prédominance des ligneux telles que *Faidherbia albida, Balanites aegyptiaca, Guiera senegalensis* avec un tapis dominé par *Zornia glochidiata* et *Mitracarpus scaber.*

- **Site de Sadoré**

La répartition de la végétation sur le site de Sadoré tient à la situation de la toposéquence de cette zone (Lamine, 2008 ; Seyni Bodo, 2011, 2012 ; Zounon, 2015) *:*

- Sur les plateaux cuirassés s'y développe une végétation forestière contractée dominée par des espèces comme *Guiera senegalensis, Combretum micranthum*, et *Combretum nigricans ;*
- Sur les zones sableuses de glacis, La strate arbustive est marquée par la prédominance des espèces comme *Guiera senegalensis, Combretum glutinosum* et *Combretum micranthum*, *Faidherbia albida, Ziziphus mauritiana, Hyphaena thebaica* etc. On note une importante régénération naturelle de la strate herbacée et arbustive dans les parties mises en jachère. La strate herbacée est dominée par *Zornia glochidiata*. *Aristida sp*., *Cenchrus biflorus*, *Sesamum alatum*, *Hibiscus sp.*
- Sur les sols des bas-fonds (hydromorphes et zone de terrasse dans vallée du fleuve) les espèces dominantes sont : *Prosopis africana, Sclerocarya birrea, Piliostigma reticulatum et Acacia nilotica.* Quant à la strate herbacée, elle est dominée d'une manière générale par *Zornia glochidiata* et *Mitracarpus scaber*.

- **Site de Arraourayé**

Le site de Arrourayé est caractérisé par une végétation constituée d'espèces comme *Piliostigma reticulatum*, *Faidherbia albida*, *Guiera senegalensis*, *Balanites aegyptiaca*, *Combretum glutinosum*, *Calotropis procera*.

La végétation herbacée est composée d'espèces annuelles et est dominée par *Zornia glochidiata*, *Acanthosperum hispidum*, *Commelina benghalensis*, *Cenchrus biflorus*, *Aristida mutabilis*, *Alysicarpus ovalifolius*, *Eragrostis tremula*, *Cyperus amabilus*, *Sida cordifolia* (Awaiss, 1996 ; Awaiss *et al.,* 1996).

- **Site de Tarna**

La végétation sur le site de Tarna est fortement anthropisée et principalement caractérisée par les espèces ligneuses comme *Faidherbia albida*, *Acacia tortilis, Acacia senegal, Acacia ehrenbergiana et Balanites aegyptiaca* dans les surfaces agricoles et pastorales. Sur les lits des Goulbi on note quelques enclaves pastorales (espace pastorale situé en zone agricole

dédié exclusivement à l'activité des pasteurs) et les couloirs de passage du bétail. La strate herbacée est dense et constituée par *Eragrostis tremula, Zornia glochidiata*, *Cenchrus biflorus, Schoenefeldia gracilis, Loudetia togoensis, Echinochloa stagnina* et *Aristida sp*. (SRAT, 2008).

3.5. Démographie

Le tableau 2 et la figure 23 illustrent, selon les données des recensements généraux de la population du Niger, l'évolution de la population dans les régions et les départements qui concernent nos sites d'étude (INS, 2013). Les deux régions connaissent une forte croissance démographique (tableau 2) à l'image de la croissance démographique nationale, la plus élevée au monde. Une croissance démographique de 245 % et 204 % est observée respectivement dans la région de Maradi et celle Tillabéri entre 1988 et 2012, soit plus qu'un doublement du nombre d'habitant en 24 ans. Elle se traduit par un taux d'accroissement naturel constant sur les périodes 1988-2001 et 2001-2012, soit de 3,7 % dans la région de Maradi et de 3 % dans la région de Tillabéri. La densité de la population dans la région de Maradi est de 81 habitants/km². Cette région reste plus peuplée que celle de Tillabéri dont la densité est de 28 habitants/km². On retrouve globalement les mêmes tendances au niveau départemental, notamment à Madarounfa et Mayahi, respectivement pour les sites de Tarna et Arraourayé, et le département de Kollo pour les sites de Banizoumbou et Sadoré (figure 23).

Tableau 2: Evolution de la population des régions de Maradi et Tillabéri entre 1960 et 2012

Régions	Recensement générale de la population			Taux d'accroissement naturel (%)	
	1988	2001	2012	1988-2001	2001-2012
Maradi	1 389 433	2 235 570	3 404 645	3,7	3,7
Tillabéri	1 328 283	1 872 436	2 715 186	3	3

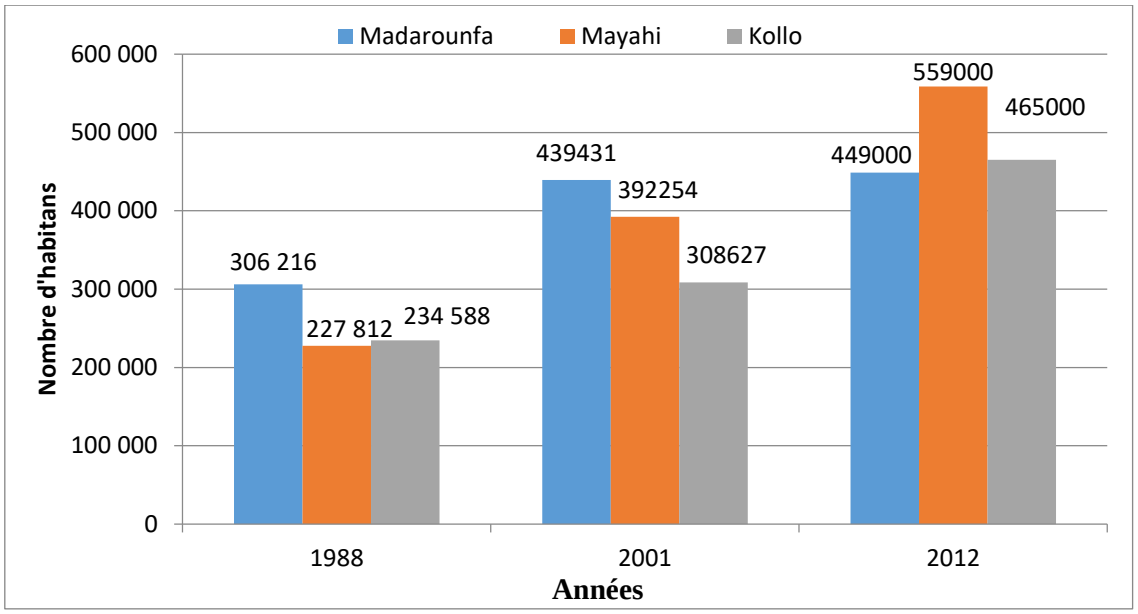


Figure 23: Évolution de la population des départements de Kollo, Madarounfa et Mayahi entre 1988 et 2012.

Le fort taux d'accroissement de la population n'est pas sans conséquence sur les ressources naturelles des zones d'étude. Il se traduit en effet par une pression accrue sur les ressources agricoles (sol et végétation). On assiste ainsi à la saturation de l'espace entrainant une réduction des surfaces cultivées et du temps des jachères et par là même un rallongement du temps nécessaire à la reconstitution de la fertilité des terres. Pour subvenir aux besoins alimentaires de cette population sans cesse croissante, l'extension des surfaces cultivées, occupées sur des sols peu fertiles, est l'une des premières alternatives pour les populations. Cela a pour conséquence la réduction du couvert végétal et la compaction des sols et l'accentuation de la dégradation des sols et du couvert végétal (Ambouta, 1994). Mais l'extension des surfaces cultivées n'est possible que si la réserve foncière (y compris les terres marginales à l'agriculture) n'est pas un facteur limitant. En effet, dans la zone de Maradi où aucune réserve foncière n'est disponible, on assiste à la transformation profonde des habitudes et des techniques : usage de traction attelée, gardiennage privé des animaux sur les parcelles, utilisation et épandage à grande échelle des engrais chimiques (Yamba, 2004). Par contre, dans la région de Tillabéri, la réserve foncière n'est pas un facteur limitant avec une potentialité d'environ 4.480.000 ha dont seulement le quart est exploité (ME/LCD, 2004). On note là aussi une diminution considérable des superficies de champ mises en jachère et du temps consacré à cette pratique.

Chapitre 4 : Typologie des entités homogènes de surface du sol, connaissance locale de la fertilité et de l'hétérogénéité de surface du sol [2]

4.1. Introduction

La variabilité de surface induite par la modification du couvert végétal est un phénomène très marqué au Niger, pays sahélien 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 Banoin, 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).

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. Cette partie de notre travail sera consacrée à l'évaluation des 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 aux enquêtés (âge, niveau d'instruction, mode d'acquisition des terres, tailles des champs), à leurs connaissances des indicateurs de la fertilité des sols et de l'hétérogénéité de surface du sol, leurs connaissances des facteurs déterminant l'hétérogénéité 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.

[2] Cette chapitre est en partie publiée dans la revue Etude et Gestion des Sols. 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 (1), 65-79.

4.2. Matériel et méthodes

Les enquêtes semi-directives ont été réalisées dans cinq villages représentatifs dans les communes des sites d'étude. Les sites de Banizoumbou et Sadoré (région de Tillabéri) sont respectivement dans les communes de Dantiandou et Youri. Dans la région de Maradi, les sites de Arraourayé et Tarna sont respectivement dans les communes de Sharkin Haoussa et Safo. La figure 24 illustre ces différentes communes.

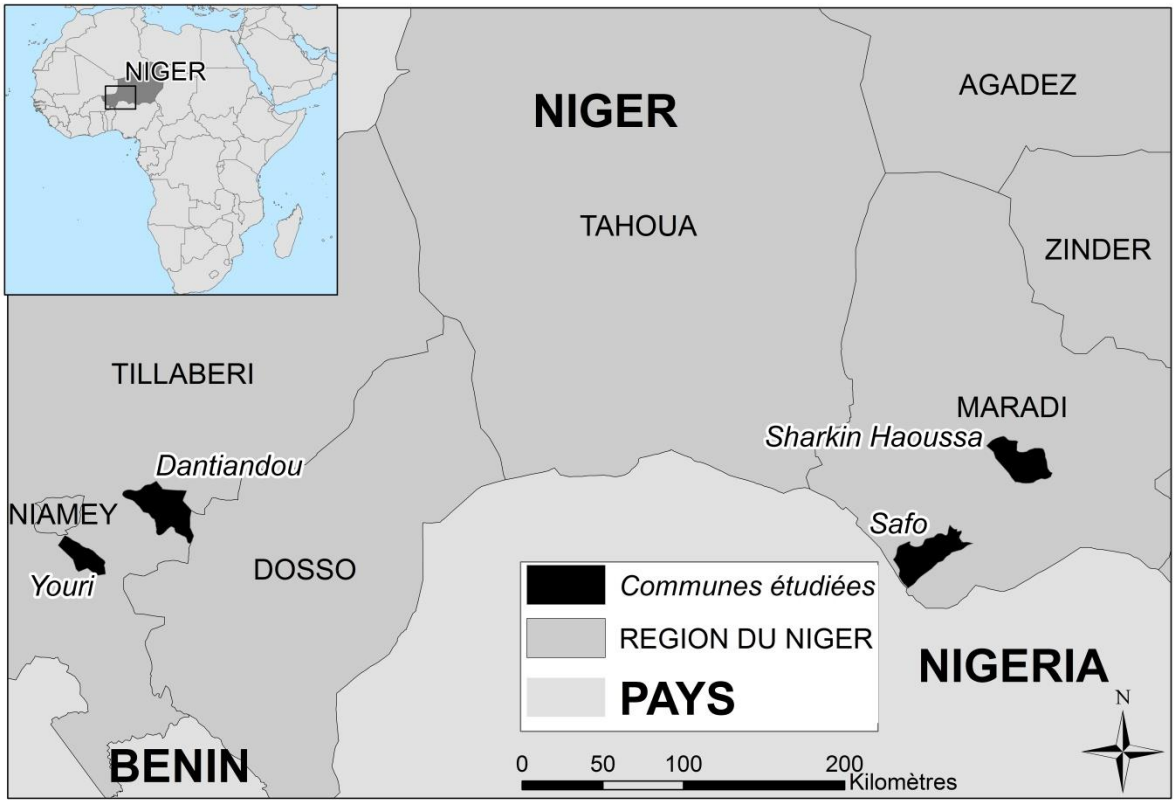


Figure 24: Situation géographique des communes étudiées

Les villages retenus dans la commune de Dantiandou en plus du village de Banizoumbou étaient, Boundou, Koma Koukou, Youlwa, Tondikiboro et dans la commune de Youri en plus de Sadoré, les villages retenus étaient Gardji, Dolga banizoumbou, Damari, Finaré. Dans la commune de Sharkin Haoussa, les villages de Gakudi, Dan Banga, Dan Dada et Dan Tanko étaient associés à celui de Arraourayé. Dans la commune de Safo, les enquêtes ont concerné en plus du village de Tarna, ceux de Aderaoua, El Mougou Jaki, Riadi, Soumarana. Dans chacun des 20 villages concernés, 30 producteurs ont été interrogés suivant un questionnaire semi-structuré, ce qui représente un total de 600 entrevues 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.

La première étape consiste en la réalisation de la typologie des entités homogènes de surface du sol (EHS) et la seconde a consisté en la conduite et l'administration de questionnaire d'enquêtes auprès des producteurs.

La typologie des EHS a été réalisée grâce à des prospections et des observations de terrain complétées par des entretiens semi-directs réalisés avec les producteurs (Figure 25 et 26).

La typologie a été établie au niveau des villages de Banizoumbou (commune de Dantiandou, région de Tillabéri), à Sadoré (commune de Youri, région de Tillabéri), à Arraourayé (commune de Sharkin Haoussa, région de Maradi) et Tarna (commune de Safo, région de Maradi). A la suite de cette identification, une typologie des EHS a été établie sur la base des caractéristiques des états de surface en zone sahélienne définies par Casenave et Valentin (1989).

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 enquêté et enquêteur. 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 (figure 27). Les entretiens semi-directs réalisés durant la première étape ont servi à tester et affiner ce questionnaire auprès des producteurs.

Les données recueillies ont été traités par des analyses statistiques descriptives 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 fertilité des sols et l'hétérogénéité de surface du sol, 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 (cosinus^2) 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 25: Prospection des champs avec les paysans

Figure 26: Séance d'enquête dans les champs chez les producteurs

4.3. Résultats

4.3.1. Typologie des entités homogènes de surface du sol

Huit types d'EHS ont été identifiées sur l'ensemble des sites, à savoir les entités de surface à croûtes d'érosion (ERO), à croûtes de décantation (DEC), à croûtes de dépôts éoliens (EOL-GS), à croûtes structurales associées au houppier de *Faidherbia albida* (ST-FA), les entités de surfaces normales ou surfaces de référence à croûtes structurales (ST-SN), à croûtes structurales associées aux fourmilières (ST-F), à croûtes de décantation sur alluvion (DEC-AL), à croûte de décantation sur alluvion sous le houppier de *Faidherbia albida* (DEC-AL-FA).

- les entités de surface à croûtes d'érosion (ERO). Elles sont caractérisées par des particules fines formant une pellicule plasmique (figure 27). 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 ;

Figure 27: Entités de surface à croûte d'érosion (ERO) sur le site de Banizoumbou

- 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 (figure 28). 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 le travail de sol favorable au drainage des eaux ;

Figure 28: Entité de surface à croûtes de décantation (DEC) sur le site de Banizoumbou (commune de Dantiandou, région de Tillabéri)

- 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 (figure 29). 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.

Figure 29: Entité de surface à croûtes de dépôts éoliens (EOL-GS) sur le site de Arraourayé

- 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 (figure 30). 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. Elles sont présentes sur tous les sites.

Figure 30: Entité de surface à croûtes structurales associées au houppier de Faidherbia albida (ST-FA)

- les entités de surface à croûtes structurales associées aux fourmilières (ST-F). Elles sont associées à des débris organiques récoltés par les fourmis (figure 31). 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 fourmilière, recouverte par une surface à croûte d'érosion qui n'est jamais mise en culture. Les entités de surface à croûtes structurales associées aux fourmilières ne se rencontrent que dans la région de Maradi.

Figure 31: Entité de surface à croûtes structurales associées aux fourmilières (ST-F)

- 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 (figure 32). Elles sont constituées par des particules fines et des débris organiques déposés sur les terrasses alluviales du Goulbi de Maradi (Gleysols). 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 ;

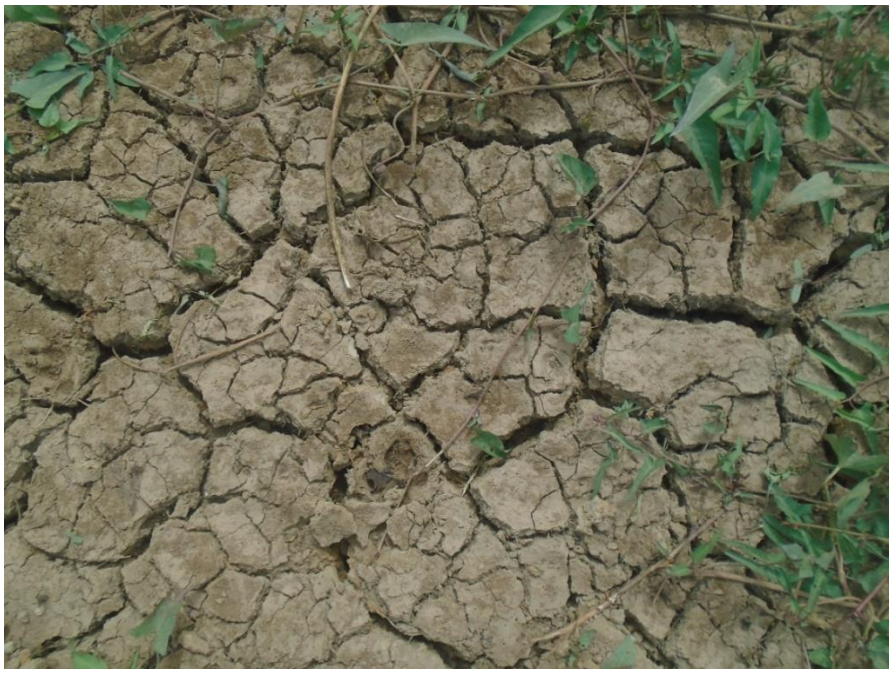


Figure 32: Entité de surface à croûtes de décantation sur alluvions (DEC-AL) sur le site de Tarna

- Les entités à croûte de décantation sur alluvion sous le houppier de *Faidherbia albida* (DEC-AL-FA). Ce sont des surfaces qu'on retrouve sur les Gleysols du *Goulbi* de Maradi et qui se distinguent des entités DEC-AL par l'accumulation d'important débris organiques (Figure 33) ;

Figure 33: Entité à croûte de décantation sur alluvions sous le houppier de Faidherbia albida (DEC-AL-FA)

Les croûtes de décantation développées sur les alluvions du *Goulbi* se distinguent de celles des Arénosols Ferraliques par leur texture fine, l'épaisseur de la croûte, la taille et la profondeur des fentes de retrait (figure 34).

(a) (b)

Figure 34: Photographies d'une croûte de décantation. (a) sur sols ferrugineux tropicaux à Banizoumbou (Région de Tillabéri), (b) sur sol alluvial du Goulbi de Maradi

- les entités de surfaces normales ou surfaces de référence à croûtes structurales (ST-SN) (Figure 35). Ce sont les surfaces caractéristiques des champs cultivés sur Arénosols Ferraliques. 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.

Figure 35: Entité de surfaces normales ou surfaces de référence à croûtes structurales après sarclage (ST-SN), photo prise après une pluie

Le tableau 3 indique la répartition des différents types d'EHS au sein des différents sites. Les EHS sont similaires sur les 2 sites de la région de Tillabéri. On note l'absence des surfaces de type EOL-GS et DEC sur la commune de Safo (site de Tarna). L'absence des EHS de type EOL-GS est surtout liée à la disparition des arbustes de *Guiera senegalensis* utilisé fortement comme bois d'énergie, tandis que des EHS de type DEC est liée à la topographie relativement homogène de ce site et à la pratique d'un travail de sol favorable au drainage des eaux.

Les surfaces de type DEC-AL et DEC-Al-FA ne sont présentes que sur la commune de Safo, sur le site de Tarna où se trouvent les sols alluvionnaires de Goulbi. Les entités ERO ne sont présentes qu'à Sadoré et Banizoumbou (Tillabéri), de même les surfaces de type ST-F ne se trouvent qu'à Arraourayé et Tarna (Maradi). Cette différence spatiale pourrait être liée :

- au type de travail du sol en l'occurrence à Tarna où le travail profond du sol avant et durant la saison des pluies empêche la formation des croûtes d'érosion ;
- à la multiplicité des associations de culture dans le même champ et la production du souchet qui favorisent une forte activité de récolte des fourmis surtout granivore d'où la formation des édifices de fourmilières relativement importants sur les sites de Maradi par rapport à Tillabéry. A noter que les pratiques culturales de production du souchet désagrègent le sol, notamment en période de récolte en raison d'une part d'un travail profond du sol pour déterrer les graines de souchets et, d'autre part, d'un tamisage du sol. La manifestation de l'érosion éolienne dans ces champs se traduit par l'élimination des éléments fins contrariant ainsi la formation des surfaces de type ERO.

Tableau 3: Répartition des entités homogènes de surface du sol en fonction des sites d'études

Entités homogènes de surface du sol	Région de Tillabéry		Région de Maradi	
	Banizoumbou	Sadoré	Arraourayé	Tarna
ERO	x	x	-	-
ST-FA	x	x	x	x
DEC	x	x	x	-
EOL-GS	x	x	x	-
ST-SN	x	x	x	x
ST-F	-	-	x	x
DEC-AL	-	-	-	x
DEC-AL-FA	-	-	-	x

X = présence de l'entité de surface ; - = absence de l'entité de surface

4.3.2. Caractéristiques des producteurs enquêtés

La figure 36 présente la répartition des producteurs de niébé enquêtés par site et selon trois classes d'âges.

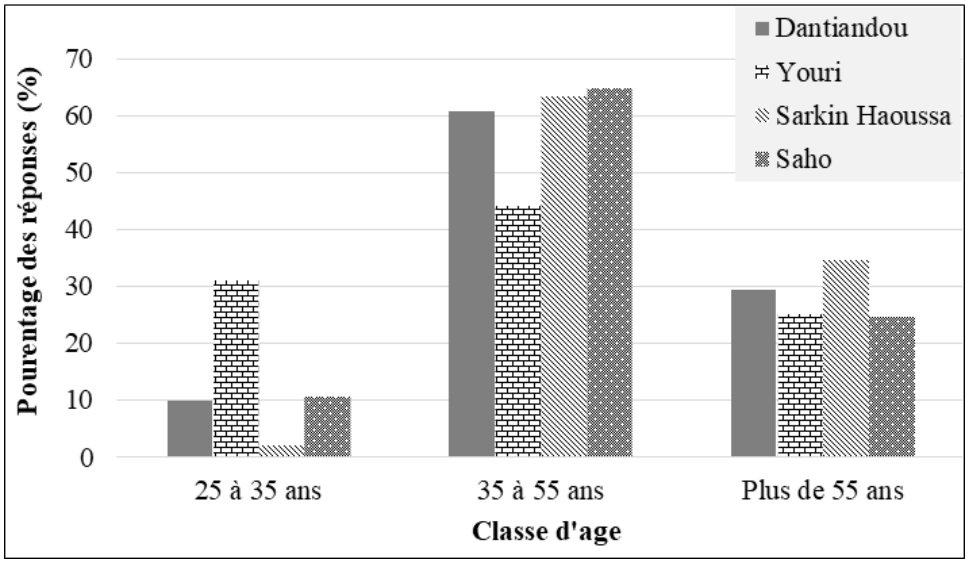


Figure 36: Répartition des enquêtés selon leurs classe d'âge

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 6 % à Youri à 43 % à Safo. Elle est de 9 % et 13 % sur les sites de Dantiandou et Sharkin Haoussa, respectivement (Figure 37).

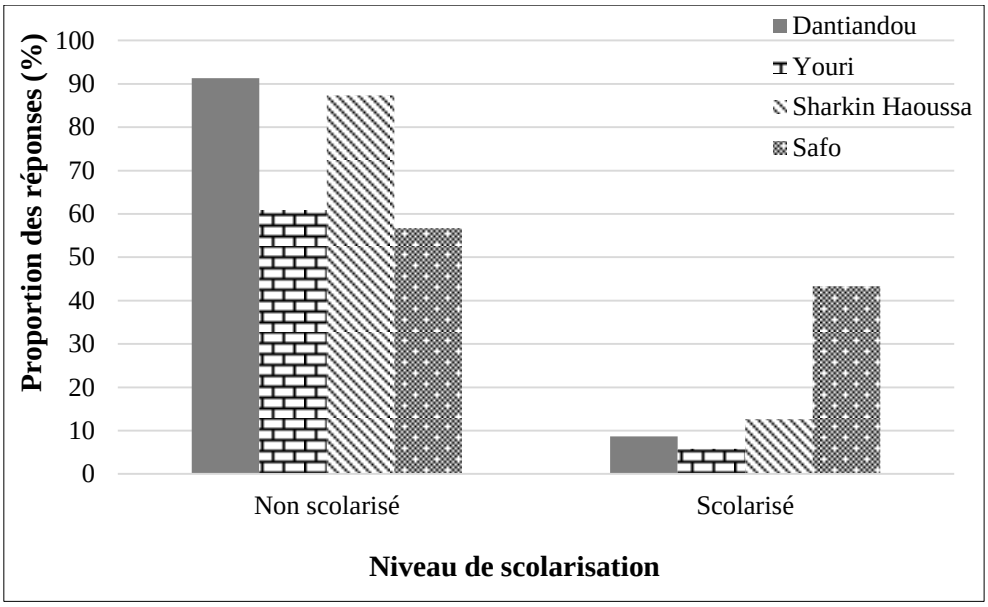


Figure 37: Répartition des enquêtés en fonction du critère de scolarisation.

4.3.3. Mode d'acquisition des terres cultivées en niébé

La figure 38 présente le mode d'acquisition des terres sur les sites d'étude.

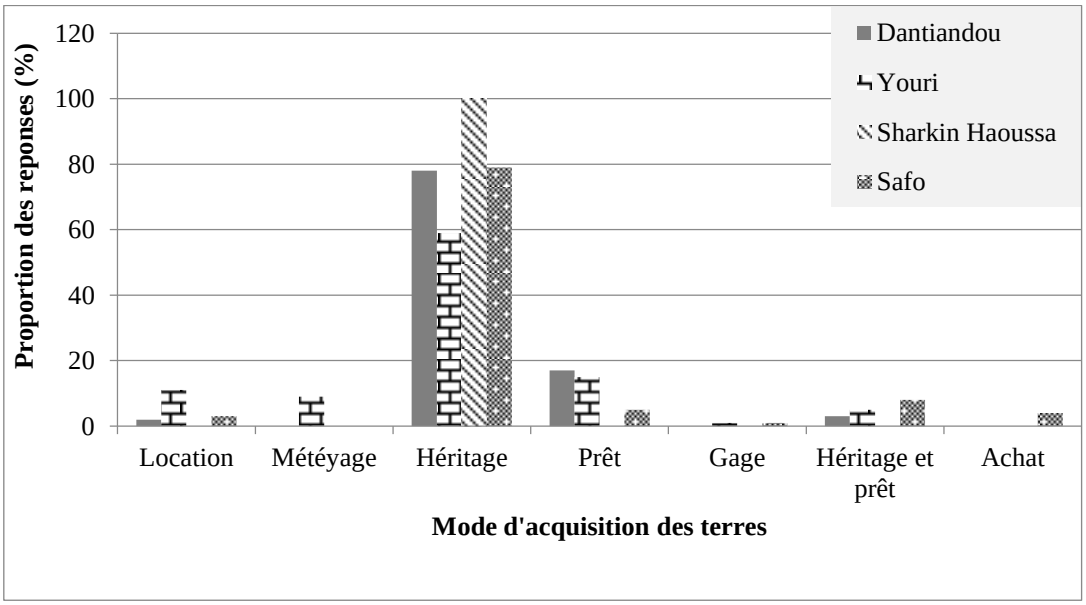


Figure 38: Mode d'acquisition des terres cultivé en niébé sur les sites d'étude

Il ressort de l'analyse de cette figure qu'il y a différents modes d'acquisition des terres cultivées en niébé. Le principal mode d'obtention des terres sur l'ensemble des sites est l'héritage. Ce mode concerne entre 59 et 100 % des paysans enquêtés. Le prêt constitue le deuxième mode d'acquisition, très répandu particulièrement sur les sites de Dantiandou et de Youri où il concerne respectivement 17 et 15 % des paysans enquêtés. On note des

proportions non négligeables de paysans qui obtiennent leur champ par location (2 à 11 %) sur les sites de Dantiandou, Youri et Safo. On note par ailleurs que le métayage est pratiqué seulement dans la zone de Youri et l'achat uniquement dans la zone de Safo.

4.3.4. Superficie moyenne des champs cultivés en niébé par ménage

La figure 39 illustre les superficies moyennes des champs cultivés en niébé sur l'ensemble des sites. L'analyse de cette figure montre que les superficies des champs cultivés en niébé par ménage varient d'un site à un autre. En effet, les superficies emblavées pour la culture de niébé sont plus importantes sur les sites de Dantiandou (5,6 ± 1,1 ha), Sharkin Haoussa (5,2 ± 1,3 ha) et Youri (4,7 ± 1 ha) et plus petites sur le site de Safo (2,2 ± 0,8 ha).

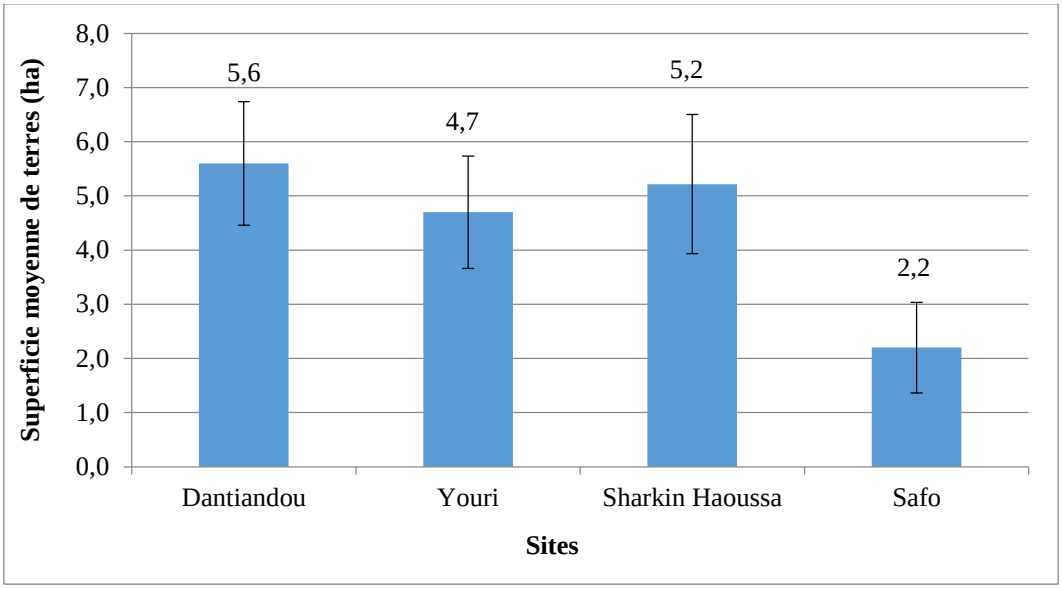


Figure 39: Superficie moyenne par ménage des champs cultivés en niébé sur l'ensemble des sites

4.3.5. Perception de l'état de fertilité des sols dans les champs de niébé

Une perception de baisse généralisée de la fertilité des sols dans les champs de niébé a été exprimée par les enquêtés sur l'ensemble des sites. Sur les sites de Dantiandou et Youri (région de Tillabéri), entre 84 et 94 % des paysans enquêtés ont constaté la baisse de fertilité des sols dans leur champs alors qu'à Sharkin Haoussa et Safo (région de Maradi) le constat de la baisse concerne l'ensemble des paysans (100% des enquêtés, tableau 4).

Tableau 4: Perception de l'évolution de la fertilité des sols sous culture de niébé sur l'ensemble des sites

Constat de la fertilité des sols	Fréquence par site (%)			
	Dantiandou	Youri	Sarkin Haoussa	Safo
Baisse de la fertilité des sols	84	94	100	100
Pas de baisse de la fertilité des sols	16	6	0	0

4.3.6. Indicateurs paysans de fertilité des sols

La fertilité des sols est perçue par les paysans à travers plusieurs indicateurs synthétisés dans les tableaux 5, 6, 7 et 8. Sur l'ensemble des sites, la couleur du sol, les caractéristiques morphologiques de la plante au cours de son cycle végétatif et la présence de certaines espèces végétales caractéristiques constituent des indicateurs principaux utilisés dans l'appréciation de la fertilité des sols par rapport à la culture de niébé.

Les sols de couleur noire ou sombre sont reconnus comme les plus favorables pour la production du niébé, tandis que leurs homologues d'aspect clairs sont identifiés comme défavorables. Les sols de couleur noire ou sombre sont appelés « *labou bi* » en zarma sur le site de Dantiandou, *loubal ou kobowlé* en peulh sur le site de Youri (région de Tillabéry) alors que sur les sites de Sharkin Haoussa et Safo des termes comme *baka jigawa, Bakin Kassa* ou encore *Kassan Goulbi ou Kassan Fadama* sont couramment utilisés. Ce critère est révélé comme favorable à la culture du niébé par 37 à 58 % des paysans enquêtés sur les sites de Dantiandou, Youri et Safo. Cet aspect sombre est relié aux apports de fumier ou à la présence de *laka* (Haoussa) ou *Botogo* (Zarma) qui désignent l'argile dans le sol. Les sols d'aspects clairs sont désignés par *Labou Koirey* en Zarma ou *Farin wurin, farin kassa* ou encore *Farin Jigawa* en Haoussa. Entre 49 et 81 % des enquêtés sur les sites de Youri et Safo utilisent ce critère pour reconnaitre les sols défavorables à la production du niébé. L'aspect clair de ces sols est synonyme de lessivage et de pauvreté en nutriments et en matière

organique dus à la surexploitation continue des terres ou la perte de matière organique par érosion ou par le ruissellement.

Les caractéristiques morphologiques de la plante au cours de son cycle végétatif, à savoir une bonne germination et une bonne vigueur associée à une couleur vert foncé des feuilles et de bons rendements, sont des critères utilisés par 97 % des paysans enquêtés à Sharkin Haoussa pour juger de la fertilité des sols dans leurs parcelles agricoles. Le mauvais développement des plants de niébé, à savoir la mauvaise germination et croissance, le rabougrissement et la coloration jaune des feuilles et les faibles rendements, sont des critères évoqués par 96 % des paysans de Sharkin Haoussa pour indiquer les sols de faible fertilité et défavorables pour le niébé.

La végétation est un excellent critère d'appréciation de la fertilité des sols pour les paysans. Au total 23 espèces végétales (dont 20 herbacées et 3 ligneux) ont été fréquemment citées par les paysans comme indicatrices de fertilité de sol sur l'ensemble des sites (tableau 7). Sur les sites de Dantiandou et Safo, 11 et 21 % des paysans enquêtés ont souligné ce critère. Les espèces herbacées les plus citées sur l'ensemble des sites sont : *Cenchrus biflorus, Zornia glochidiata, Pennisetum pedicellatum, Jacquemontia tamnifolia, Commelina forskalaei, Corchorus tridens, Cyperus alopecuroides*. La présence des espèces ligneuses comme *Faidherbia albida, Piliostigma reticulatum* et *Guiera senegalensis* dans les champs sont également des indicateurs d'une bonne aptitude des champs vis-à-vis de la production du niébé. Dix-sept espèces végétales dont 13 herbacées et 4 ligneuses ont été citées comme indicatrices des sols peu fertiles (tableau 8). Les espèces herbacées les plus connues pour indiquer la pauvreté des sols en lien avec la culture du niébé sont *Mitracarpus scaber, Eragrotis tremula, Striga gesnerioides et Cassia mimosoides.* Pamis les ligneux, *Balanites aegyptiaca* semble être la plus citée.

Sur les sites de Dantiandou et Safo, 11 et 21 % des paysans enquêtés soutiennent que d'autres indicateurs tels que l'absence de fumier, de macrofaune, de végétation et jachère sont aussi évoqués par les paysans. Sur les sites de Dantiandou et Youri, la présence des plages ayant reçu du fumier (apport, parcage) dans les champs est évoquée par 7 et 18 % des paysans enquêtés. La jachère, alternative traditionnelle pour restaurer la fertilité des sols en mettant un sol « fatigué » au repos pendant un certain temps pour lui permettre de

récupérer ses facultés productives, n'est évoquée qu'à Dantiandou. Sur ce site, 11 % des paysans enquêtés estiment que la production du niébé est meilleure à la remise en culture d'un champ à la suite d'une jachère. En langue Zarma, la première année de remise en culture d'un champ est appelée *Sakara* et la deuxième année *Lali banda* et c'est cette dernière qui semble être pour les paysans, la plus favorable pour la production du niébé. Toujours sur ce site, 4% des paysans enquêtés pensent qu'un sol sableux est un indice pour une bonne production de niébé. Bien que faiblement évoquée sur les sites de Sharkin Haoussa et Safo, la présence de la macrofaune du sol à savoir les termites et les fourmis, constitue un indicateur performant de fertilité des sols pour 1 et 2% des paysans enquêtés. Sur le site de Dantiandou, le développement des croûtes d'érosion appelé *gangani* en zarma dans les champs agricoles est le principal critère employé par la majorité des paysans enquêtés (37 %) pour déduire qu'un sol n'est pas apte à la production de niébé.

Tableau 5: Indicateurs selon la perception des paysans de fertilité des sols sous culture de niébé

Indicateur paysan de fertilité sous culture de niébé	**Proportions des réponses par site (%)**			
	Dantiandou	Youri	Sarkin Haoussa	Safo
Couleur sombre du sol	37	65	1	58
Couleur vert foncé des feuilles et bons rendements	26	11	97	15
Présence de fumier	7	18	0	0
Présence de certaines espèces végétales	11	0	0	21
Après une jachère	11	0	0	0
Sol sableux	4	0	0	0
Présence de termites et fourmis	0	0	1	2

Tableau 6: Indicateurs paysans d'infertilité des sols sous culture de niébé

Indicateur paysan d'infertilité sous culture de niébé	**Proportion des réponses par site (%)**			
	Dantiandou	Youri	Sarkin Haoussa	Safo
Sol clair du sol	23	49	3	81
Mauvais développement du niébé	31	32	96	12
Développement de croûte d'érosion	37	0	0	0
Absence de fumier	8	19	0	0
Sol très sableux	0	0	0	16
Absence macrofaune	0	0	0	2
Absence de végétation	0	0	1	10
Absence de Jachère	1	0	0	0

Tableau 7: Bio-indicateur végétale de fertilité des sols cités sur l'ensemble des sites

Noms scientifiques des espèces	Dantiandou	Youri	Sharkin Haoussa	Safo
Cenchrus biflorus	x	x	x	x
Zornia glochidiata	x	x	x	-
Pennisetum pedicellatum	x	x	x	x
Jacquemontia tamnifolia	x	x	x	x
Commelina forskalaei	x	x	x	-
Corchorus tridens	x	x	x	-
Cyperus alopecuroides	x	-	x	x
Sida cordifolia	x	x	-	-
Alysicarpus ovalifolius	x	-	x	-
Commelina bengalensis	-	-	x	x
Cyperus rotundus	-	-	-	x
Pupalalia lappacea	-	-	-	x
Bulbostylis barbata	-	-	-	x
Achyrantes aspera	-	-	-	x
Leuca martinicensis	-	-	-	x
Pupalalia lappacea	-	-	-	x
Cassia mimosoides	x	-	-	-
Tragus ssp	-	-	-	x
Faidherbia albida	x	x	x	x
Piliostigma reticulatum	x	x	x	x
Guiera senegalensis	x	x	x	x

X : Espèce citée ; - Espèce non citée

Tableau 8: Bio indicateurs végétaux d'infertilité des sols cités sur l'ensemble des sites

Noms scientifiques d'espèce	Dantiandou	Youri	Sharkin Haoussa	Safo
Mitracarpus scaber	x	x	x	x
Eragrotis tremula	x	x	x	x
Striga gesnerioides	x	x	x	x
Cassia mimosoides	-	x	x	x
Aristida mutabilis	x	x	-	-
Mariscus spp.	x	-	-	-
Aerva javanica	x	-	-	-
Crotalaria Atrorubens	-	x	-	-
Teparosia lupinipolia	-	x	-	-
Phylanthhus pentandrus	-	x	-	-
Cassia italica	-	-	x	-
Corchorus tridens	-	-	x	-
Borreria radiata	-	-	x	-
Acacia nilotica	x	-	-	-
Combretum glutinosum	x	-	-	-
Balanites aegyptiaca	x	x	x	-
Prosopis africana	x	-	-	-

X : Espèce citée ; - Espèce non citée

4.3.7. Connaissance locale de l'hétérogénéité de surface du sol par les producteurs

Les producteurs qui ont conscience de l'hétérogénéité 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, l'hétérogénéité de surface du sol 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 l'hétérogénéité 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 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.

4.3.8. Facteurs responsables de l'hétérogénéité de surface du sol selon les connaissances locales

Les principaux facteurs responsables de l'hétérogénéité 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 (tableau 9). Sur l'ensemble des sites, 32 % de la population enquêtée ont identifié 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 identifiés comme les facteurs de faible influence.

Les réponses spécifiques recueillies sur les différents sites sont regroupées dans le Tableau 9. 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 l'hétérogénéité 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.

Tableau 9: Facteurs responsables de l'hétérogénéité de surface du sol

Facteur causal	Proportion des réponses par site (%)			
	Dantiandou	**Youri**	**Sharkin 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

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 totale (Figure 40). 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.

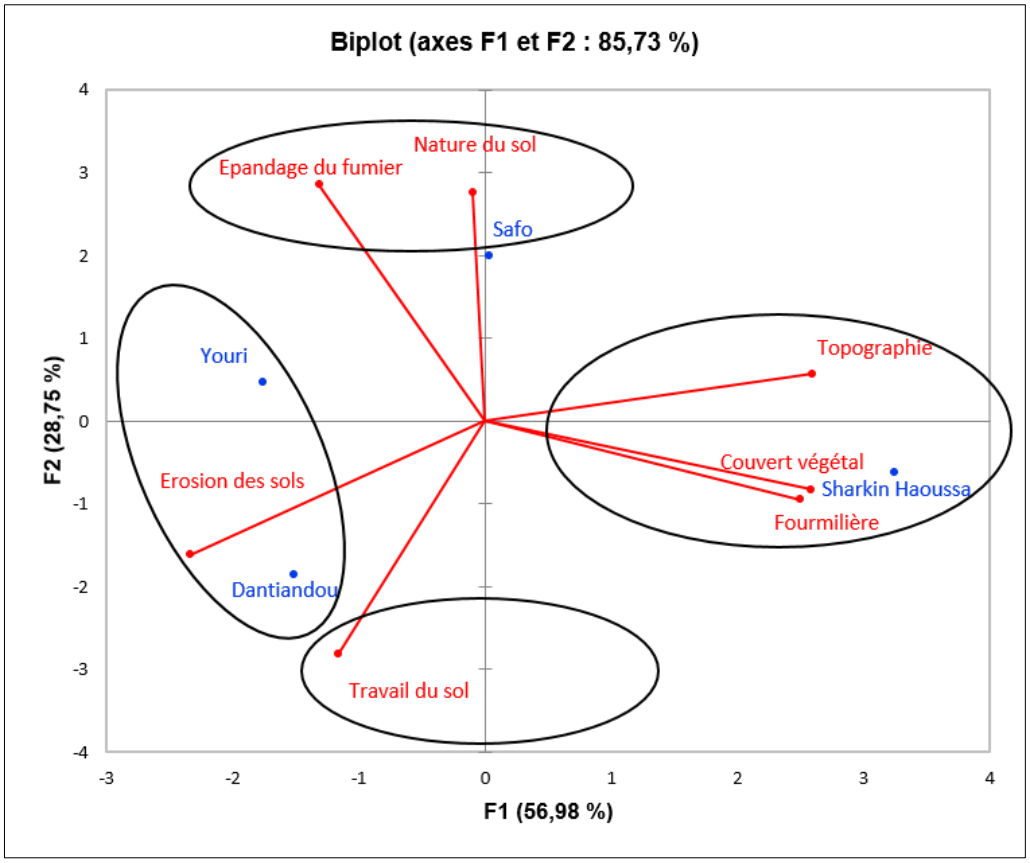


Figure 40: Analyse en composantes principales des connaissances locales des facteurs responsables de l'hétérogénéité de surface du sol sur les sites

4.3.9. 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 10**.** 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 en niébé (pluviale) est considéré comme faible.

Tableau 10: 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 de fertilité

Entités homogènes de surface du sol	Proportion des réponses par site (%)			
	Dantiandou	Youri	Sharkin 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

4.3.10. 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 identifient 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 11). Les réponses obtenues sur les sites de Youri et Sharkin Haoussa (région de Maradi) sont conformes à la 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**.** Près de la moitié des paysans enquêtés sur le site de Safo reconnaissent l'érosion et le faible niveau de fertilité des sols comme étant les contraintes majeures à la production de

niébé**.** Sur ce site, la faible capacité de rétention en eau des sols constitue une contrainte majeure identifiée par seulement 4 % des producteurs enquêtés.

Tableau 11: Proportion des contraintes édaphiques en fonction des sites selon les producteurs

Contraintes	Proportion des réponses par site (%)			
	Dantiandou	**Youri**	**Sharkin Haoussa**	**Safo**
Développement des coûtes 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

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 41). 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 12). 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 indique 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, l'érosion des sols et la capacité de rétention en eau à Safo comme contraintes édaphiques à la production du niébé.

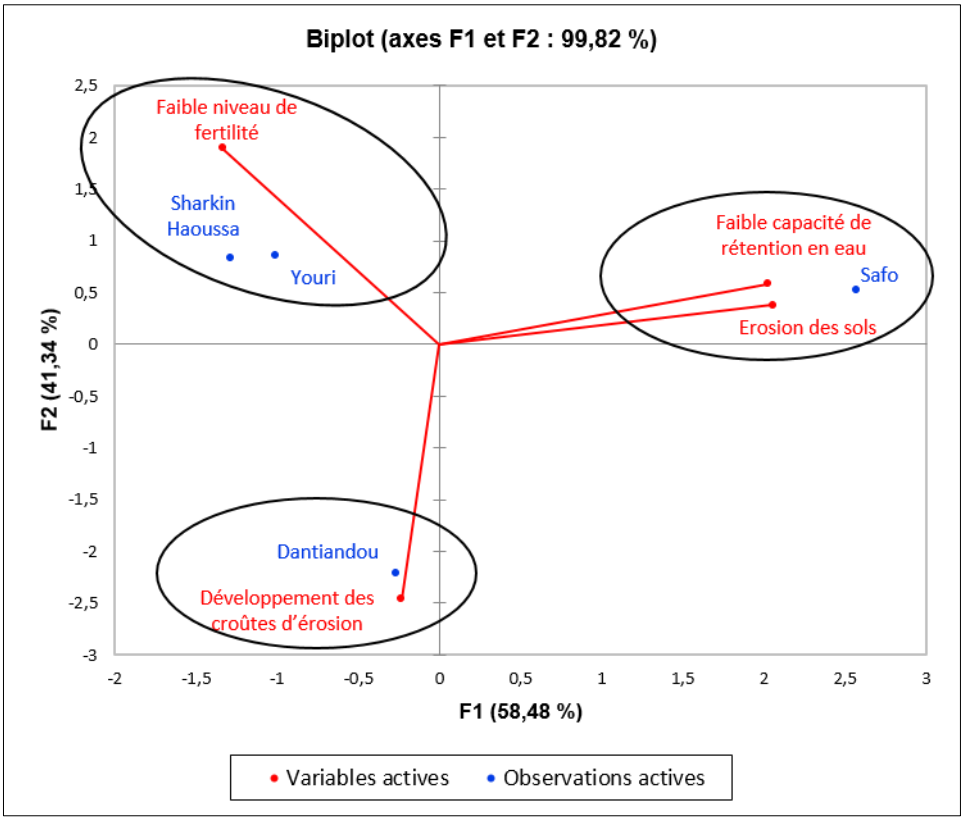


Figure 41: Analyse en composante principales des connaissances locales des contraintes édaphiques pour la production du niébé

Tableau 12: Valeurs des contributions et des cosinus² des connaissances locales 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

	F1		F2	
	Contribution	Cosinus²	Contribution	Cosinus²
Dantiandou	0,772	0,015	74,219	0,985
Youri	10,904	0,579	11,002	0,413
Sharkin Haoussa	17,788	0,699	10,620	0,295
Safo	70,535	0,960	4,158	0,040
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	0,940	3,353	0,055

4.3.11. 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 13). 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 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 13: Gestion des contraintes édaphiques liées à la production du niébé

Stratégies	Fréquence par site (%)			
	Dantiandou	Youri	Sharkin 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

4.4. Discussion

Les résultats présentés ici ont révélé l'importance de la culture du niébé sur les deux sites étudiés. Les superficies cultivées sur la majorité des sites, à savoir Dantiandou, Sharkin Haoussa et Youri, varient entre 4,7 et 5,6 ha par ménage. Ces valeurs sont supérieures à la moyenne des surfaces cultivées par ménage à l'échelle nationale, soit 3,3 ha (FAO, 2014). Néanmoins des valeurs inférieures à la moyenne nationale sont enregistrées au niveau de certains sites, notamment Safo où les surfaces cultivées par ménage est d'environ 1,7 ha par ménage. Ceci est probablement lié à la pression foncière due au poids démographique et en particulier à l'émiettement des parcelles de culture (Yamba, 2004) dont l'origine se rapporte au mode d'acquisition des terres cultivées. Les modes d'acquisition de terre répertoriés par nos enquêtes auprès des producteurs de niébé regroupent l'héritage, l'achat, la location, le prêt, le métayage et le gage. On retrouve les principaux modes d'acquisition de terres répertoriés au niveau national (Ousmane, 2017). Néanmoins, il est à signaler une différence concernant le mode d'acquisition dominant. Celui-ci est représenté à l'échelle nationale par l'acquisition par achat, tandis qu'au niveau de nos sites d'étude c'est plutôt l'héritage qui est majoritairement représenté. Cette tendance se retrouve également à travers les résultats de plusieurs travaux qui indiquent que 89 % et 97 % des terres agricoles, respectivement dans la zone de Tillabéri et celle de Maradi, sont acquises par héritage (Issaka, 2001 ; Boureima, 2004 ; Sanda Gonda, 2012 ; Karimou et Atikou, 2014). Ce type d'accès des terres a pour inconvénient l'émiettement et le morcellement des champs à chaque partage d'héritage. A long terme ceci constitue un frein à l'augmentation de la productivité en dépit de l'accroissement du nombre de personnes par ménage (Scaglia *et al.,* 2001).

La perception de la baisse généralisée de la fertilité des sols dans les champs de culture de niébé constitue un deuxième aspect révélé par les résultats de ce travail. Cet aspect est signalé par l'ensemble des paysans sur les sites de Sharkin Haoussa et Safo (100 % des paysans enquêtés de la région de Maradi) et 84 et 94 % des personnes enquêtées respectivement à Dantiandou et Youri (région de Tillabéry). Ces résultats sont conformes à ceux de plusieurs travaux mettant en avant les liens entre la baisse ou la perte de la fertilité des sols cultivés dans plusieurs régions du Niger, y compris la région de Tillabéry et de

Maradi. (De Rouw, 1998 ; Ambouta *et al*., 1998 ; Issaka, 2001 ; Hountondji *et al.,* 2004 ; Bielders *et al.,* 2004).

Les indicateurs utilisés par les producteurs de la région de Maradi et de Tillabéri pour caractériser l'état de fertilité de leurs sols pour la production du niébé, on retrouve le développement des précédentes cultures (germination et croissance, rendement des cultures), la couleur et les états de surface du sol, en particulier les types de végétation, les encroûtements et dans une certaines mesures les activités biologiques. On retrouve les mêmes critères chez les paysans du Cameroun (M'Biandoun *et al.*, 2007), du bassin Okpara au Benin (Akpo et al., 2016). La couleur du sol semble être l'indicateur le plus communément utilisé pour déduire la fertilité des sols par les paysans (Kissou *et al.*, 2014) suivi du développement des cultures précédentes. Les résultats obtenus par Issaka (2001) dans la région de Maradi (Niger), montrent que 99 % des paysans enquêtés évaluent l'infertilité de leurs champs à travers la mauvaise croissance des plantes et les mauvais rendements des années précédentes. Le type de végétation constitue un excellent indicateur de la fertilité des sols, dénommé «bioindicateur de la fertilité des sols » par plusieurs auteurs (Somé *et al.,* 1999 ; M'Biandoun *et al.,* 2003 ; Mamoudou *et al.,* 2015 ; Zerbo *et al.,* 2016). Parmi les espèces indicatrices de la bonne fertilité des sols identifiés par les paysans sur l'ensemble de nos sites on retrouve des espèces herbacées (*Cenchrus biflorus, Zornia glochidiata, Jacquemontia tamnifolia, Pennisetum pedicellatum, Cyperus alopecuroides)* et ligneuses, comme *Faidherbia albida, Piliostigma reticulatum* et *Guiera senegalensis.* Quant aux espèces végétales symptômatiques d'un affaiblissement de la fertilité des sols, elles regroupent les espèces herbacées, telles que *Mitracarpus scaber, Eragrotis tremula, Striga gesnerioides* et *Cassia mimosoïdes*, et ligneuses, comme *Balanites aegyptiaca.* Ce répertoire de plantes bioindicatrices de la fertilité des sols intègrent des espèces révélées par de nombreux travaux consacrés à la reconnaissance des zones fertiles ou infertiles (M'Biandoun *et al*., 2007 ; Mamoudou *et al.*, 2015 ; Donfack et Seignobos, 1996 ; Moussa Bouzou et Yamba, 2008 ; Sarr *et al.,* 2013 ; Mamoudou *et al.,* 2015 ; M'Biandoun *et al.*,2007 ; Akpo *et al.*, 2016). Cependant, des espèces indicatrices de bonne fertilité des sols sur un site peuvent être perçues comme indicatrices de sols dégradés dans un autre site (Akpo *et al.,*2016). C'est par exemple le cas de *Cassia mimosoïdes* identifiée comme indicatrice de bonne fertilité à Dantiandou alors qu'elle indique des sols infertiles pour les enquêtés de Youri, Sharkin

Haoussa et Safo. La perception des différentes espèces végétales peut, en effet, varier selon les formes d'utilisation et l'abondance de celles-ci. Ceci révèle le caractère contextuel de la perception de fertilité à travers les bioindicateurs et la difficulté à les généraliser sans précaution préalable (Winkler Prins, 2003 ; Akpo et al., 2016).

L'apparition des encroûtements superficiels semblent être un critère prépondérant d'analyse de la fertilité dans l'ouest du Niger. A titre d'exemple pour 37 % des paysans enquêtés sur le site de Dantiandou, la présence et le développement des croûtes d'érosion sont des critères suffisant pour qualifier un sol d'infertile. Cette appréciation est conforme aux résultats obtenus par Ambouta *et al.* (1996) et De Rouw (1999) qui indiquent que le développement de la végétation est fortement contrarié sur les surfaces portant des grandes plages de croûtes d'érosion.

Les résultats obtenus montrent que la variabilité et l'hétérogénéité de surface du sol sont des caractéristiques bien connues par les producteurs nigériens de niébé. Les résultats présentés ici ont montré que la variabilité de surface du sol est une notion bien connue par les producteurs de niébé de deux régions agricoles sahéliennes du Niger (Tillabéri et Maradi). 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.,* 2005ab ; 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 Serpantier, 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.

4.5. Conclusion partielle

Cette étude a permis de mettre en evidence les connaissances paysannes de la fertilité des sols, de l'hétérogénéité de surface du sol et la gestion des contraintes édaphiques associées. Les résultats ont révélé que sur l'ensemble des sites, les producteurs perçoivent bien la problématique de la gestion de la fertilité en lien avec l'hétérogénéité de surface du sol qui caractérise leurs parcelles. Les connaissances acquises à travers leur expérience sur des longues périodes dans l'agriculture permettent aux paysans de hiérarchiser les entités homogènes de surface du sol selon leur niveau de fertilité et leur potentiel de production. Pour apprécier le niveau de fertilité des sols, les résultats ont révélé que les paysans utilisent certains critères comme la couleur du sol, la croissance des cultures ou des bio-indicateurs végétaux. Les contraintes édaphiques majeures liées à la production du 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. L'application de la fumure organique, en particulier le fumier, constitue l'alternative la plus utilisée par les paysans pour endiguer ces contraintes et optimiser la production du niébé.

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 et dans le reste du monde.

Chapitre 5:Cartographie et caractérisation de l'hétérogénéité de surface du sol

5.1. Introduction

L'hétérogénéité de la surface de sol se manifeste à différentes échelles en relation avec les processus impliqués dans sa formation. Elles regroupent : l'échelle millimétrique et centimétrique où se déroulent les processus de détachement et désagrégation de particules à l'origine de la formation des encroûtements superficiels et les activités biologiques ; l'échelle décimétrique à métrique qui prend en considération les processus de ruissellement, d'érosion éolienne et d'érosion hydrique qui donnent naissance aux loupes d'érosion et aux accumulations sableuses en lien avec la couverture végétale. Sa caractérisation *in situ* peut être envisagée à l'échelle d'une parcelle, sur la totalité de la surface d'un champ, d'un terroir ou d'un bassin versant. La nature, le nombre et l'extension des surfaces homogènes qui constituent l'hétérogénéité de la surface du sol varient en fonction du système d'étude et de l'échelle de mesures considérée (Casenave et Valentin, 1989 ; Tourino Soto, 2005).

Les méthodes d'analyse de l'hétérogénéité de surface du sol sont nombreuses. On peut par exemple citer les méthodes d'analyse spatiale au moyen de la télédétection permettant d'étudier la variabilité dynamique, à la surface du sol, de l'état et du fonctionnement du couvert végétal décrite par la distribution spatiale d'une variable radiométrique telle que l'indice de végétation par différence normalisée (NDVI) (Garrigues, 2004). Plusieurs travaux indiquent que les cartes des rendements constituent une méthode efficace de l'analyse de l'hétérogénéité de surface du sol (Zwaenepoel et Le Bars, 1997 ; Panneton et al., 2002 ; Tourino Soto, 2005). La télédétection permet également de caractériser et cartographier la variabilité spatiale du sol et le suivi de leur fonctionnement hydrique à l'échelle intraparcellaire (Michot, 2003 ; Houlès, 2004). Une autre méthode d'analyse de l'hétérogénéité de surface du sol est l'approche des états de surface. Casenave et Valentin (1989) ont développé la notion de surfaces élémentaires pour cartographier les états de surface en zone sahélienne. Elle s'applique aux surfaces cultivées et naturelles, non ou peu anthropisée, qu'elle découpe en plusieurs entités homogènes de surface. D'autres méthodes se basent sur la couleur du sol par l'utilisation du code Munsell (Koné et Assa).

Dans cette partie nous mettons en œuvre une démarche de cartographie adaptée à l'étude de l'hétérogénéité de la surface des sols à l'échelle des champs paysans.

La cartographie constitue un outil nécessaire à l'analyse globale de la variabilité structurale ou fonctionnelle. L'établissement de cartes d'occupation du sol à l'échelle des champs agricoles permet d'apprécier la forte variabilité de surface du sol, jusqu'à présent peu prise en compte dans la conduite des cultures (Douzals, 2000).

La démarche de cartographie développée ici donne un premier niveau de caractérisation spatiale des surfaces homogènes identifiées dans les agrosystèmes étudiés, de la complexité du système considéré et l'extension des surfaces homogènes.

L'analyse cartographique est insuffisante pour appréhender le fonctionnement des entités homogènes de surface. C'est pourquoi elle doit être associée à une approche fonctionnelle de l'hétérogénéité mettant en jeu les caractéristiques intrinsèques de la surface du sol.

Ce chapitre traite, d'une part, de la cartographie de l'hétérogénéité de surface du sol à l'intérieur des parcelles agricoles et, d'autre part, sa caractérisation en lien avec les propriétés physico-chimiques des sols.

5.2. Matériel et méthodes

5.2.1. Description des parcelles étudiées

La cartographie de l'hétérogénéité de surface a été conduite à l'échelle de 3 champs représentatifs sur les sols ferrugineux tropicaux (Arénosols Ferralique) dans chacun des sites et d'un champ représentatif sur les sols alluviaux (Gleysols) de Goulbi Maradi sur le site de Tarna. Le choix en nombre de ces champs repose sur le fait qu'une entité homogène de surface peut-être présentée dans un champ et absente dans un autre. Nous avons dû choisir ces champs pour couvrir au mieux l'ensemble des entités homogènes de surface du sol responsables de l'hétérogénéité sur chacun des sites. Sur chaque site, les champs sont tous choisis sur les mêmes unités morpho-pédologiques.

- **Site de Banizoumbou**

La superficie des champs retenus sur le site de Banizoumbou est de 4,9, 4,6 et 4,1 ha respectivement pour les champs 1, 2 et 3. Ils situés à proximité du village de Banizoumbou. Ils sont mis en cultures depuis les années 1970 et leurs dernières mises en jachère

remontent à 1988 pour le champ 1, 1991 pour le champ 2 et 2009 pour le champ 3. L'exploitation continue de ces champs s'accompagne d'une restitution en matière organique relativement négligeable. Les résidus de cultures sont systématiquement ramassés après les récoltes.

- **Site de Sadoré**

La superficie des champs retenus sur le site de Sadoré est de 4, 3,9 et 2,6 ha respectivement pour les champs 1, 2 et 3. Ils sont situés à proximité du village de Sadoré. Ces champs font l'objet d'une exploitation continue sans mis en jachère depuis les années 1980 après l'ouverture du centre de recherche sahélien, International Crops Research Institute for the Semi-Arid Tropics (ICRISAT). Néanmoins, ils bénéficient quelques fois d'apport de matière organique (fumier) en général par le parcage des animaux ou la mobilité périodique de l'habitat dans les champs. Après les récoltes, les résidus de cultures sont ramassés avec pour conséquence l'exposition des sols à l'érosion durant la longue période de saison sèche (Figure 42).

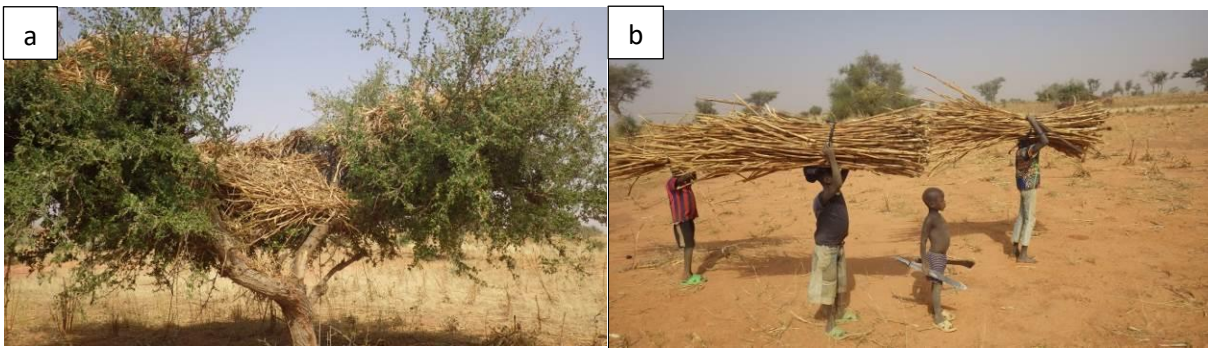


Figure 42: (a) Stockage des résidus de cultures de mil et du niébé sur *Ziziphis mauritiana*, (b) exportation des résidus de cultures du mil par les enfants vers la maison sur le site de Sadoré (campagne agricole 2015)

- **Site de Arraourayé**

La superficie des champs retenus sur ce site est de 1,3, 2,9 et 4,9 ha respectivement pour les champs 1, 2 et 3. Ils sont situés à proximité du village de Arraourayé. Ils sont mis en culture depuis 1970. Ils situés dans la première auréole du village. La dernière jachère remonte en 2005 pour le champ 1, en 1994 pour le champ 2 et en 1985 pour le champ 3.

Très peu d'apport de la fumure organique est effectué dans ces champs et les résidus de cultures sont systématiquement ramassés après les récoltes.

- **Site de Tarna**

Sur sols ferrugineux tropicaux, la superficie des champs est de 4,3, 4,1 et 1,9 ha respectivement pour les champs 1, 2 et 3. Ils sont situés à proximité du village de Tarna. Le champ sur sols alluviaux (Gleysols) a une superficie de 2,1 ha. Il est situé à presque 1 km du village et sa mise en culture remonte en 1955. Ces champs connaissent une forte mise en culture sans aucune alternance de jachère. La gestion de la fertilité des sols est basée sur l'épandage important de fumure organique et l'utilisation d'engrais chimiques. Les résidus de cultures sont systématiquement ramassés après les récoltes.

5.2.2. Cartographie de l'hétérogénéité de surface du sol

La démarche méthodologique comprend deux étapes : la prise d'images aériennes et le traitement des images aériennes.

La prise d'images aériennes a été conduite l'aide d'un drone de type T-800, équipé d'une caméra de type Sony Nex 7 (16 mm) avec 24 millions de pixels.

Sur le site de Banizoumbou, les photos ont été prises le 27 Mai 2015 au niveau des champs 1, 2 et 3, respectivement au nombre de 203, 216 et 236 à une hauteur de vol de 123 et 124 m. A Sadoré, les photos prises sur les champs 1 et 2 compilent 197 photos prises à une hauteur de vol de 125 m. 151 photos ont été prises sur le champ 3 à 123 m de hauteur de vol. Elles ont été prises à la même résolution que celle de Banizoumbou le 30 Mai 2015. Sur le site de Arraourayé, les photos prises sont respectivement au nombre de 162, 181 et 221 avec une hauteur de vol 125 mm. Elles ont été prises le 19 Juin 2015. Sur les sites de Tarna, les images sur les champs 1, 2 et celles sur sols alluviaux de Goulbi sont au nombre de 220 photos à 121 m de hauteur de vol et au niveau du champ 3. Ce sont 220 photos qui ont été prises à 125 m de hauteur de vol. Toutes les images ont été prises à la même résolution sur l'ensemble des sites (2,5 cm/pixel). Toutes les images par champ ont été ensuite combinées pour produire l'hortophoto géo référencée de chaque champ grâce au logiciel Agisoft PhotoScan 1.1.1. La figure 43 illustre quelques images prises lors de la phase d'acquisition des images par le drone.

Le traitement des images acquises est basé sur la méthode de digitalisation sur écran à l'aide du logiciel ArcGis 10.0. Elle consiste en la numérisation des entités homogènes de surface observées sur les hortophoto. Cette méthode présente l'avantage d'agrandir à volonté les images aériennes pour mieux distinguer les entités de surfaces à digitalisées. Chaque entité de surface a été digitalisée sous la forme de polygones à géométrie variable. Une table attributaire associe à chaque entité de surface délimitée par la superficie qu'elle occupe. Ce traitement a permis de définir 8 classes correspondant aux différentes entités homogènes de surface du sol rencontrées sur l'ensemble des zones d'étude.

Figure 43: Réalisation des prises de vue d'image aérienne avec le drone. a) Drone au moment du lancement ; b) Drone à l'atterrissage, c) Photo d'une prise par le drone à Arrouarayé le 25 Août 2015

5.2.3. Caractérisation physico-chimique des entités homogènes de surface

La caractérisation physico-chimique a été réalisée sur deux séries d'échantillons de sol composites prélevés à 0-10 cm de profondeur dans chaque entité homogène de surface. La première série d'échantillons comprenant 6 répliquâts, soit 120 échantillons composites par entité homogène, a été collectée durant la saison 2015 (Tableau 14). La seconde série

d'échantillons comprenant 3 répliquâts en dehors des entités ST-F où on a 6 répliquâts, soit 66 échantillons composites par entité homogène, a été prélevée durant la saison culturale 2016 (Tableau 15).

Tableau 14: Nombre d'échantillons collectés durant la saison de culture 2015

	Sites				
EHS	Banizoumbou	Sadoré	Araourayé	Tarna	Total
ST-FA	6	6	6	6	24
EOL-GS	6	6	6	-	18
ST-SN	6	6	6	6	24
DEC	6	6	6	-	18
ERO	6	6	-	-	12
ST-F	-	0	6	6	12
DEC-AL	-	0	-	6	6
DEC-AL-FA	-	0	-	6	6
Total échantillon	30	30	30	30	120

Tableau 15: Nombre d'échantillons collecté durant la saison culture 2016

	Sites				
EHS	Banizoumbou	Sadoré	Araourayé	Tarna	Total
ST-FA	3	3	3	3	12
EOL-GS	3	3	3	-	9
ST-SN	3	3	3	3	12
DEC	3	3	3	-	9
ERO	3	3	-	-	6
ST-F	-	-	6	6	12
DEC-AL	-	-	-	3	3
DEC-AL-FA	-	-	-	3	3
Total échantillon	15	15	18	18	66

Les deux séries de prélèvement ont été réalisés à la tarière selon un schéma d'échantillonnage différent en fonction de la forme géométrique de l'entité de surface du sol. On distinguera (figure 44) :

- les entités homogènes de surface de forme circulaire. Elles regroupent les surfaces liées aux houppiers de *Faidherbia albida* (ST-FA), aux touffes de *Guiera senegalensis* (EOL-GS) et aux fourmilières (ST-F). Les échantillons prélevés sur ces entités sont des composites constitués à partir de 12 points de prélèvement, répartis de façon

régulière sur les directions est-ouest et nord-sud en partant du centre de chaque entité;

- les entités homogènes de surface de forme rectangulaire. Elles regroupent toutes les entités de surface liées aux croûtes structurales, d'érosion et de décantation. Les échantillons prélevés sur ces surfaces sont des composites constitués de 13 points de prélèvements, répartis de façon régulière le long de deux directions diagonales sur chaque entité.

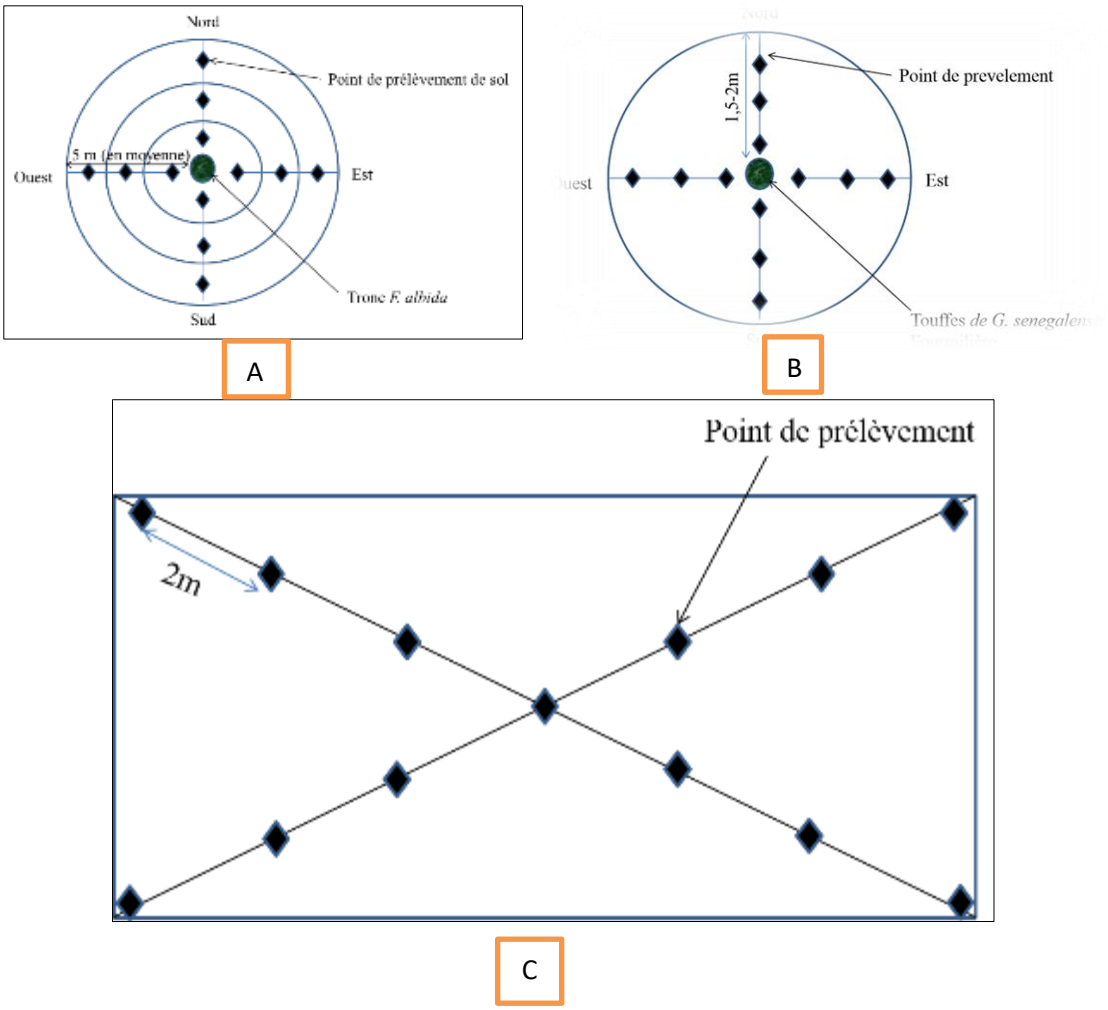


Figure 44: Distribution des points d'échantillonnage des sols. (A) au niveau des entités de type ST-FA, (B) au niveau des entités de type ST-F et EOL-GS, (C) au niveau des entités de formes rectangulaires

Les caractéristiques physico-chimiques déterminées regroupent la granulométrie, les teneurs en azote, en phosphore total et en carbone organique, les bases échangeables (Ca^{2+}, Mg^{2}, K^{+}, Na^{+}), la capacité d'échange cationique (CEC) et le pH eau.

L'analyse granulométrique a été réalisée par la méthode de la pipette Robinson selon les normes NEN5357 et ISO/DIS 11277. Cette méthode est basée sur la loi de Stockes qui régit la vitesse de chute d'une particule de forme sphérique soumise à la pesanteur dans un fluide. Les analyses ont été réalisées sur une prise d'essai de 10 g de sol tamisé à 2 mm auxquels on ajoute 500 ml d'eau distillée et 1 g l'Hexamétaphosphate de sodium $(NaPO3)_6$ agent dispersant. Les particules vont ensuite sédimenter en fonction de leur taille et de la température ambiante. La mesure de la teneur en argiles (A) et en argiles plus limons fins (A+Lf) sont effectuées par deux prélèvements successifs grâce à la pipette de Robinson suivant des temps de sédimentation bien définis. Le premier prélèvement concerne les argiles plus limons (A+L) à 4mn55'' et le second est l'argile à 8 heures après la décantation.

Les mesures de pH-eau (1 : 2,5) ont été effectuées par la méthode électrométrique au moyen d'un pH-mètre de type Ino pH 720 de marque Wyatt selon la norme NF ISO 10390. Une solution de sol est réalisée en mélangeant 10 g de terre séchée à l'air, tamisée à 2 mm, (prise d'essai représentative d'au moins 5 mL) avec 25 ml d'eau distillée bouillie pour éliminer le CO_2. La mesure du pH de cette solution est effectuée après une phase d'agitation d'une heure sur table oscillante, suivie d'une phase de décantation de 30 minutes. La lecture de la valeur de pH de la solution analysée se fait après stabilisation de la solution, en surveillant la position d'immersion des électrodes qui doivent se situer dans la partie claire de la suspension.

La teneur en carbone organique des sols a été mesurée par la mesure de la perte au feu (PAF) selon la norme NF EN 15169. Cette méthode donne une indication du taux de matière organique et de la teneur en carbone organique du sol. La mesure s'effectue sur un échantillon de sol placé dans des creusets de masse connue. L'échantillon est ensuite introduit dans un four de calcination à 550°C (figure 45) pendant 5 heures. Cette opération provoque la destruction du contenu organique de l'échantillon de sol et le dégagement du gaz carbonique (CO_2) et de la vapeur d'eau. Le taux de matière organique et la teneur en carbone de l'échantillon de sol est déterminée selon la formule suivante :

$$MO = \frac{\big(A - (B - C)\big) * 100}{A}$$

$$Carbone = \frac{MO}{1{,}724}$$

Avec : MO = taux de matière organique ; A = Masse de l'échantillon de sol après passage à l'étude à 105 °C introduit dans le creuset (g) ; B = Masse du creuset et des cendres (g) ; C= Masse du creuset vide (g).

Figure 45: Vue du four de calcination. A noter les échantillons placés dans les creusets et posés à l'intérieur et à l'extérieur du four de calcination.

Les bases échangeables (Ca^{2+}, Mg^{2}, K^{+}, Na^{+}) ont été extraites à partir de 10 g d'échantillon de sol saturé pendant une nuit par une solution d'acétate d'ammonium à 1 mol.l^{-1} (volume=100ml) à pH 7 (norme NF X 31- 130). Les dosages ont été effectués à l'aide d'un spectrophotomètre à émission de flamme pour le potassium et par un spectromètre à absorption atomique pour le sodium, le calcium et le magnésium.

La capacité d'échange cationique (norme NF X 31- 130) a été déterminée à partir de 10 g de sol saturé à l'acétate d'ammonium pendant 24 h. Après le sol est à nouveau saturé avec une solution de chlorure de potassium. Cette opération permet d'extraire les ions ammonium (NH_4^{+}). Les ions NH_4^{+} extraits sont ensuite dosés par la mesure de la densité optique à l'aide d'une auto analyseur.

La teneur en azote total des échantillons de sol a été déterminée par la méthode de Kjeldahl (NF ISO 11261). Cette méthode comporte une phase de minéralisation durant laquelle 1 g de sol est mélangé à 4 ml d'acide H_2S0_4 et $C_7H_6O_3$ en présence de H^2O_2 et du sélénium utilisé comme catalyseur. Cette phase permet de transformer tous les composés azotés de

l'échantillon de sol en azote ammoniacal. Durant la seconde phase, l'absorbance de la solution du complexe ammoniacal formé lors de la minéralisation est mesuré à 660 nm à l'aide d'un spectrophotomètre. La valeur d'absorbance obtenue est proportionnelle à la teneur en azote total de l'échantillon analysé.

La détermination du phosphore total comprend également une phase de minéralisation et une phase de dosage. Durant la phase de minéralisation, 5 g de terre ont été mélangés à 35 ml d'acide nitrique. Cette attaque, qui se déroule sur une plaque chauffante sous hotte durant 5 heures, permet de transformer le phosphate présent dans l'échantillon en orthophosphate. La solution obtenue est ensuite mélangée à de l'acide chlorhydrique et de chlorure d'ammonium, puis agitée et filtrée à l'aide d'un filtre Whatman. Durant la phase de dosage, une prise aliquote de 5 ml du filtrat obtenu est mélangée avec du molybdate d'ammonium et de chlorure de cyanure, puis diluée à 50ml avec de l'eau distillée. Le mélange ainsi obtenu est laissé au repos pendant 5h pour permettre une bonne stabilisation de la couleur. L'absorbance du complexe phosphomolybdate formé est mesuré à 660 nm à l'aide d'un spectrophotomètre RD-2000

La teneur en phosphore total est obtenue par la formule suivante :

$$Pt\ (ppm) = \frac{C \times V1 \times V2}{A \times S}$$

V1 désigne le volume de la solution d'acide chlorhydrique et de chlorure d'ammonium et V2 le volume complété à 50 ml après ajout de molybdate d'ammonium et de chlorure de cyanure. A le volume prélevé avant l'ajout des acides chlorhydrique et de chlorure d'ammonium et S la terre prise pour l'essai.

La densité apparente des sols dans les entités homogènes de surface a été déterminée par la méthode au cylindre (Figure 46). Six échantillons de sols non déstructurés ont été prélevés en fin de saison des pluies, sur une profondeur de 5 cm, au moyen d'un cylindre de 100 cm^3. La masse sèche à 105 °C des échantillons de sol prélevés a été mesurée après séchage à l'étuve pendant 48 heures.

La densité apparente est obtenue par la formule suivante :

$$Da = \frac{Masse\ sèche\ \text{à}\ 105\ °C\ de\ l'\text{échantillon}\ du\ sol\ (g)}{Volume\ total\ du\ cylindre\ (cm3)}$$

Figure 46: Illustration de la procédure de mesure de la densité apparente. a) vue de la surface du sol et des cylindres de prélèvement. b) séchage des échantillons à 105 °C. c) mesure de la masse des échantillons.

Les mesures de la teneur en matière organique et celle de la distribution granulométrique des particules de sol ont servi à calculer l'indice de risque de dégradation physique des sols (Piéri, 1989) selon l'équation :

$$St\ (\%) = \frac{MO}{(A + Lf)} * 100$$

Avec St, indice de risque de dégradation physique des sols des entités ; MO, Pourcentage de matière organique de la couche de sol considérée ; (A+Lf): Pourcentage cumulé d'argile et en limon fin de cette même couche.

Cet indice exprime le rapport entre la quantité de matière organique d'un sol et sa surface d'absorption minérale, en particulier les argiles et les limons fins. Il permet d'apprécier le seuil critique du taux de matière organique en dessous duquel la productivité décroche (Piéri, 1989) et le maintien de l'édifice structural n'est plus assuré. Nous utiliserons cet indice pour classer les entités homogènes de surface du sol en trois classes :

- Les entités de surface homogènes qui ne présentent pas de risque immédiat de déstructuration (St > 9%) ;
- Les entités de surface homogènes qui présentent un risque élevé de déstructuration (St < 7 %) ;
- Les entités de surface homogènes déstructurées avec grande une sensibilité à l'érosion (St < 5 %).

Les analyses chimiques sont interprétées en référence au guide d'interprétation des analyses de sol FAO (1992) couramment utilisé en zone sahélienne. Les classes texturales sont

déterminées selon la nomenclature de l'U.S. Department of Agriculture (USDA). Le traitement statistique de l'ensemble des données collectées a été réalisé à l'aide du logiciel SPSS version 23. Une analyse Anova a été effectuée sur les données et les moyennes des variables ont été comparées en utilisant le test de Fischer au seuil de probabilité de 5%. Des analyses en composante principales ont été réalisées avec le logiciel XLSTAT 2017 sur les différents paramètres physico-chimiques pour définir la répartition des différents groupes d'entité de surface du sol.

5.3. Résultats

5.3.1. Répartition des entités homogènes de surface du sol

Les entités homogènes de type ST-SN constituent les catégories les plus représentées sur l'ensemble des champs étudiés, en particulier les champs situés sur les sols ferrugineux tropicaux (fig. 47-51 ; Tableaux 16 et 17). Les surfaces occupées par ces entités de surface sont comprises entre 72,5 et 98,5 % de la superficie totale des champs. La prédominance des entités de surface homogènes de type DEC-AL est une caractéristique particulière observée au niveau du site de Tarna dans la région de Maradi. Ces entités représentent plus de 80 % de la surface des champs situés sur les sols alluviaux du Goulbi.

Les entités liées à la présence des espèces ligneuses, notamment Guiera senegalensis pour les surfaces de type EOL-GS et Faidherbia albida pour les surfaces de type ST-FA, sont fréquentes sur l'ensemble des sites. Elles occupent des surfaces relativement faibles mais non négligeables. Les surfaces de type EOL-GS représentent en moyenne 3 % sur le site de Banizoumbou, 1,1 % sur le site de Sadoré, 1 % sur le site de Arraourayé et 0 % sur le site de Tarna. Les entités de type ST-FA occupent en moyenne 1,1 % sur le site de Banizoumbou, 1 % sur le site de Sadoré, 0,4 % sur le site de Arraourayé et 6,8 % sur le site de Tarna.

Le contraste entre les deux régions étudiées apparaît à travers la répartition des surfaces occupées par les entités de types ERO et DEC. Alors que ces surfaces occupent en moyenne 9,1 et 5 % de la surface des champs dans la région de Tillabéri, elles s'avèrent très faibles, voire inexistantes, dans la région de Maradi.

La répartition des entités de type ST-F est également une caractéristique qui varie entre les deux régions. Les superficies occupées par les entités représentent 0 à 0,3 % de la surface des champs, en particulier dans la région de Maradi.

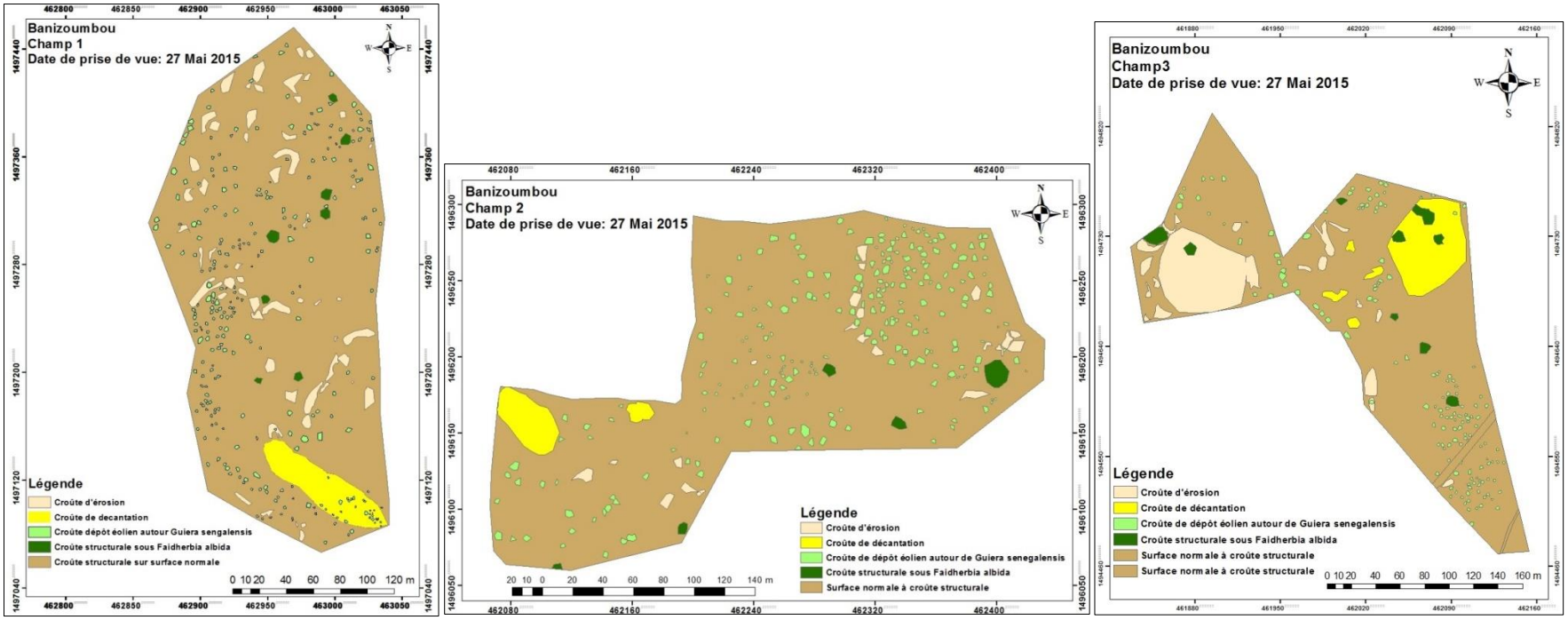


Figure 47: cartographie de l'hétérogénéité de surface du sol sur le site de Banizoumbou

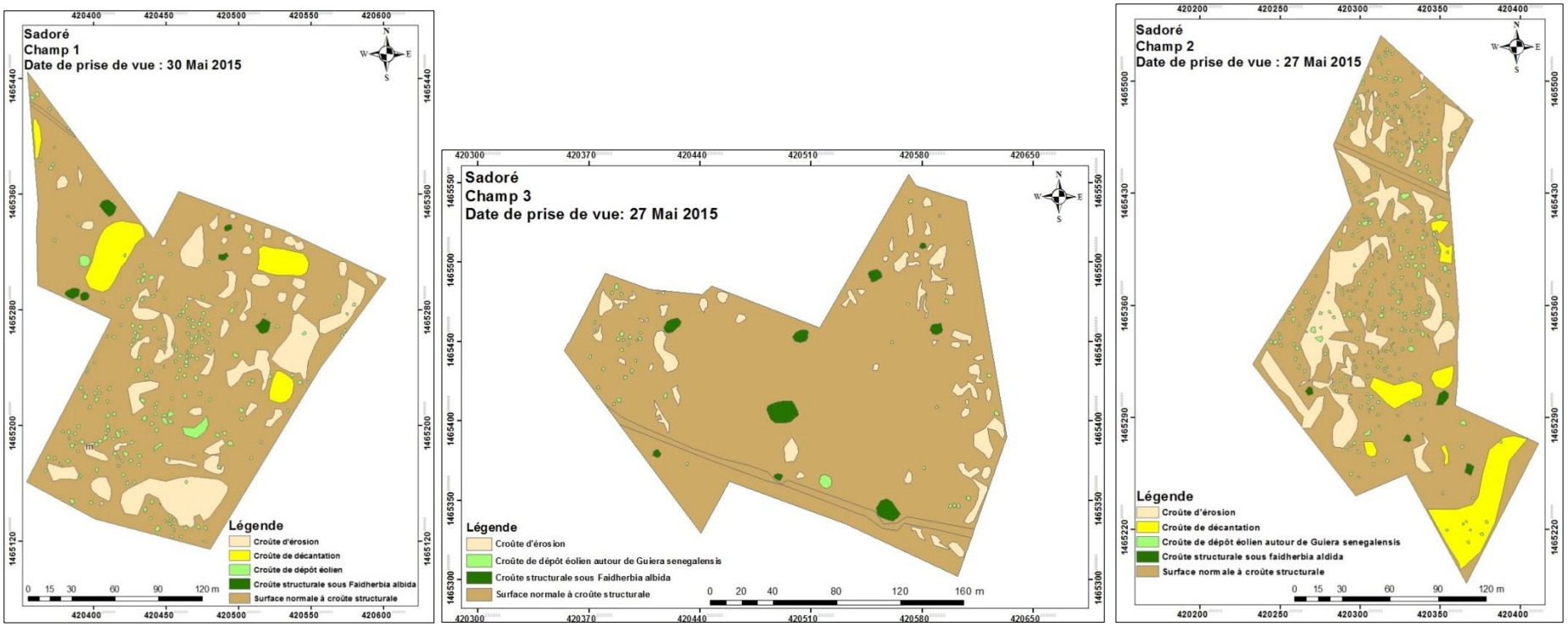


Figure 48: Cartographie de l'hétérogénéité de surface du sol sur le site de Sadoré

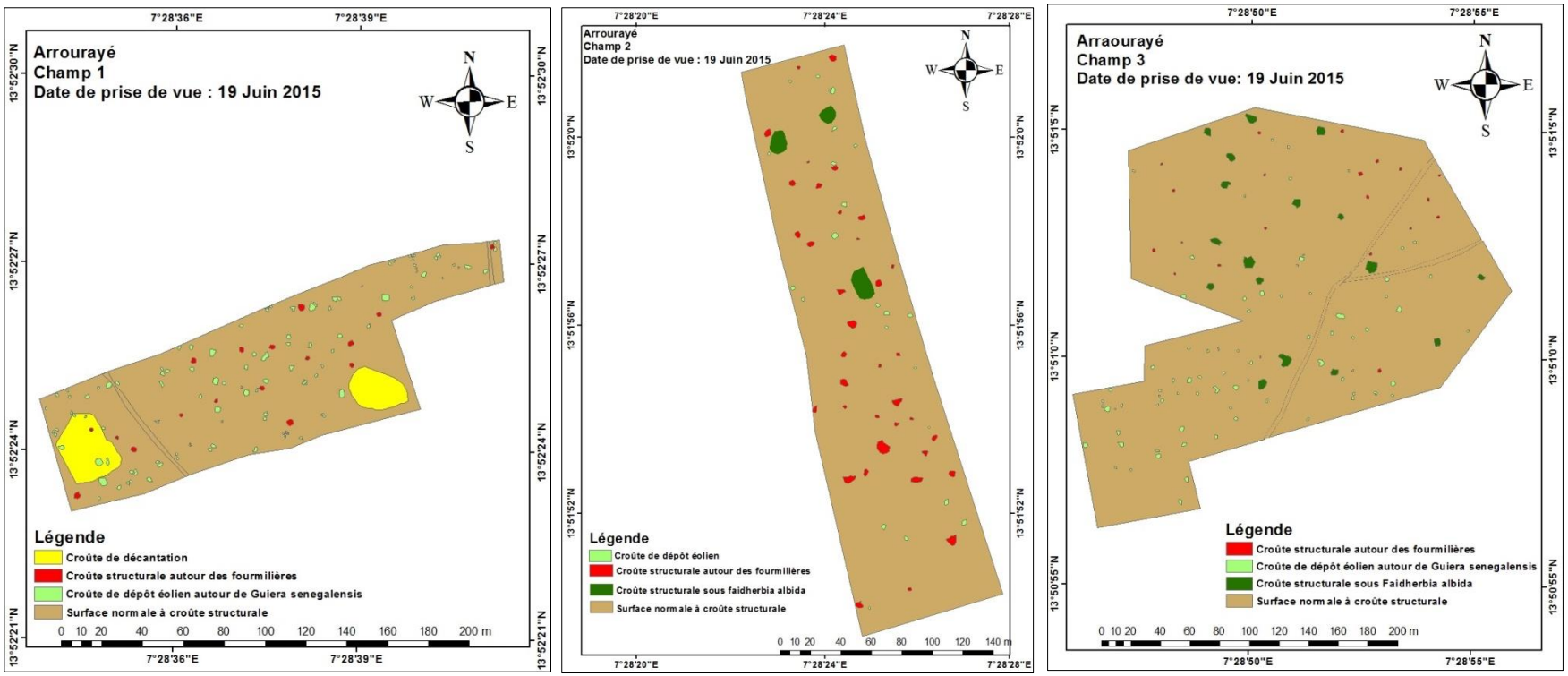


Figure 49 : cartographie de l'hétérogénéité de surface du sol sur le site de Arraourayé

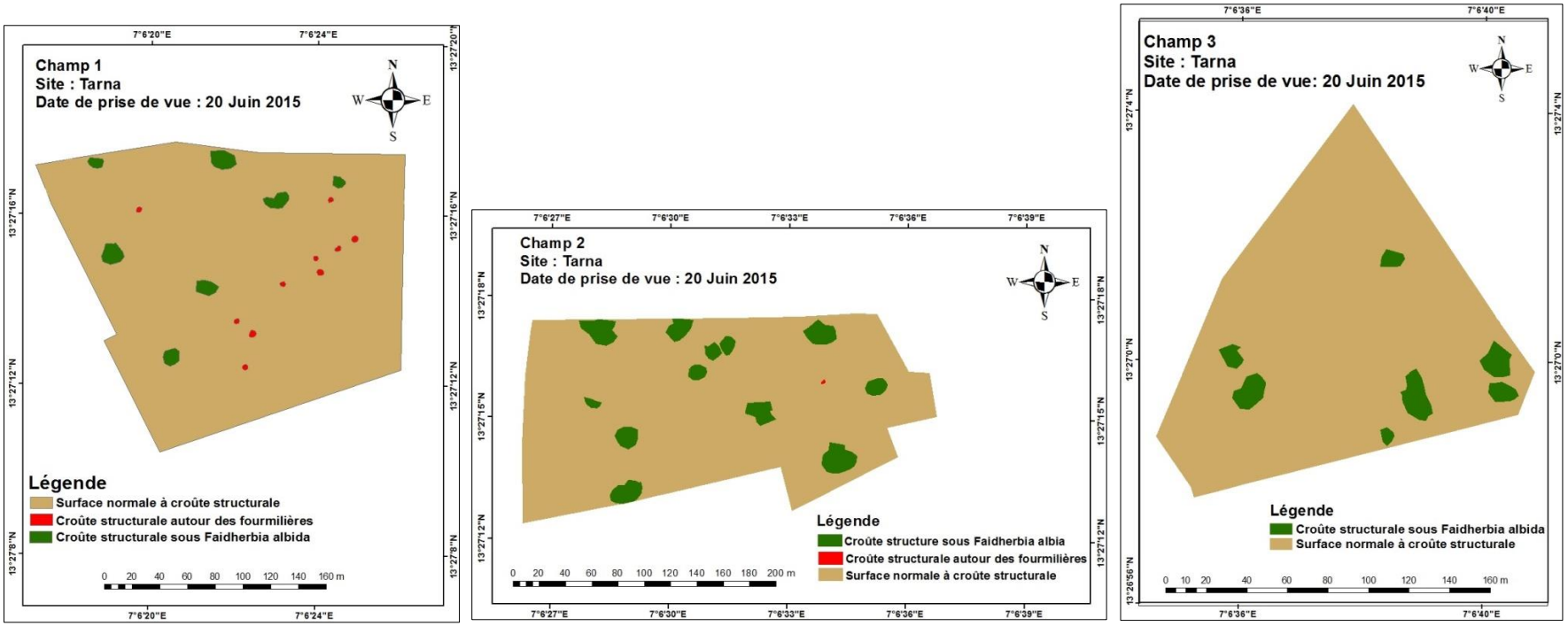


Figure 50: cartographie de l'hétérogénéité de surface du sol sur le site de Tarna

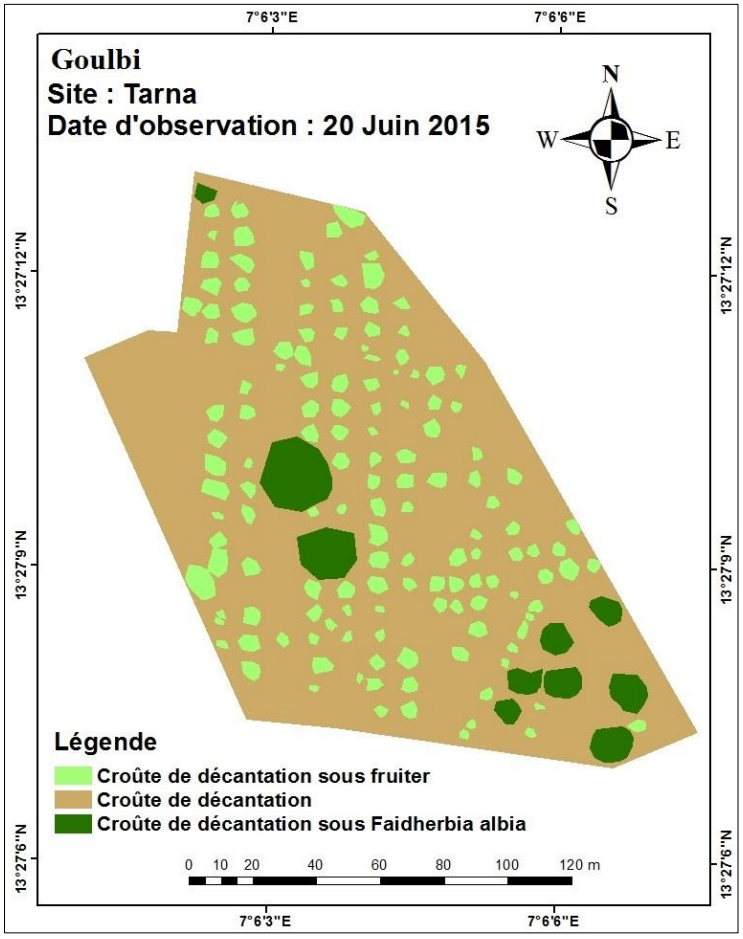


Figure 51: cartographie de l'hétérogénéité de surface du sol sur le site de Tarna

Tableau 16: Superficie et proportions des champs cultivés occupées par les entités homogènes de surface du sol sur le site de Banizoumbou

Banizoumbou						
Entités homogènes de surface du sol	**champ1**		**champ2**		**champ3**	
	Superficie (ha)	**Proportion (%)**	**Superficie (ha)**	**Proportion (%)**	**Superficie (ha)**	**Proportion (%)**
ST-SN	4,3	87,7	4,2	90,8	3,1	74,8
ST-FA	0,03	0,7	0,04	0,8	0,1	1,8
EOL-GS	0,1	2,3	0,2	4,3	0,1	2,4
DEC	0,2	4,2	0,1	2,5	0,4	8,7
ERO	0,3	5,2	0,1	1,6	0,5	12,4
Superficie totale	4,9	100	4,6	100	4,1	100
Sadoré						
ST-SN	3,0	76,0	3,5	92,4	1,9	72,5
ST-FA	0,03	0,7	0,1	1,6	0,01	0,4
EOL-GS	0,1	2,8	0,02	0,5	0,1	3,3
DEC	0,2	4,9	0	0	0,2	9,5
ERO	0,6	15,6	0,2	5,5	0,4	14,3
Superficie totale	4,0	100	3,9	100	2,6	100
Arraourayé						
ST-SN	1,2	89,4	2,9	98,2	4,8	98,4
ST-FA	0,0	0,0	<0,01	0,04	0,04	0,9
EOL-GS	0,03	2,2	0,01	0,3	0,03	0,6
DEC	0,1	7,8	0,0	0,0	0,0	0,0
ST-F	0,01	0,6	0,04	1,4	0,01	0,1
Superficie totale	1,31	100	2,9	100	4,9	100

Tableau 17: Superficie et proportions de superficie des champs cultivés occupées par les entités homogènes de surface du sol sur le site de Tarna

Entités homogènes de surface du sol	champ1		champ2		champ3		*Goulbi* de Maradi	
	Superficie (ha)	**Proportion (%)**	**Superficie (ha)**	**Proportion (%)**	**Superficie (ha)**	**Proportion (%)**	**Superficie (ha)**	**Proportion (%)**
ST-SN	4,2	97,5	3,6	86,4	1,9	95,3	-	-
ST-FA	0,09	2,1	0,6	13,6	0,09	4,7	-	-
ST-F	0,01	0,32	0,0	0,0	0,0	0,0	-	-
DEC-AL-FA	-	-	-	-	-	-	0,1	5,8
DEC-AL	-	-	-	-	-	-	1,7	80,8
Autres	-	-	-	-	-	-	0,28	13,4
Superficie totale	4,3	100	4,1	100	1,9	100	2,1	100

« - » : EHS non identifiée dans le champ

5.3.2. Caractéristiques physiques et chimiques des entités homogènes de surface du sol

5.3.2.1. Région de Tillabéri

a. Sites de Banizoumbou

Les tableaux 18 et 19 présentent les caractéristiques physiques et chimiques des entités homogènes de surface du sol sur le site de Banizoumbou.

Les entités de surface rencontrées sur le site de Banizoumbou se caractérisent par une texture à dominance sableuse (figure 52). L'analyse de variance des teneurs en argile, limons et sables et des densités apparentes ($p < 0,05$) montre des différences significatives et permettent de distinguer trois catégories d'entités de surface homogène (figure 52) :

- les entités de surface à texture sableuses. Elles regroupent les entités de types ST-SN, EOL-GS et ST-FA. Elles se caractérisent par des densités apparentes comprises entre 1,3 et 1,5. Ces valeurs sont les plus faibles de toutes les entités de surface rencontrées sur ce site ;
- les entités de surface à texture limono-sableuse. Elles comprennent les entités de surfaces de type DEC. Elles se caractérisent par des valeurs de densité apparente supérieures à 1,75. Ces valeurs de densité apparente sont les plus élevées de toutes les entités de surfaces répertoriées sur ce site ;
- les entités de surface à texture sablo-limoneuse. Elles sont représentées par les entités de surface de type ERO. Elles présentent des valeurs de densité apparente comprise entre 1,6 à 1,7.

Les valeurs moyennes de pH entre les catégories de surface distinguées ci-dessus montrent des différences qui sont significatives ($p < 0,05$, tableau 19). Elles varient entre des pH très fortement acides au niveau des entités de type ERO (pH compris entre 4,5 à 5), fortement acides pour les types DEC (pH compris entre 5,1 à 5,5) et moyennement acides au niveau des entités ST-SN, EOL-GS et ST-FA (pH compris entre 5,5 à 6).

Tableau 18: Granulométrie et densité apparente des sols des EHS sur le site de Banizoumbou

		ERO	ST-SN	DEC	EOL-GS	ST-FA
Argiles (%)	**A**	7,6a	3,8b	12,0a	2,8b	3,9b
Limons (%)	**LF**	1,6a	0,9a	8,1b	1,3a	1,3a
	LG	3,5a	3,1a	9,0b	2,6a	4,1a
Sables (%)	**SF**	45,6a	48,3a	38,5b	48,5a	55,7a
	SG	41,8a	44,0a	32,5b	44,8a	35,1a
Densité apparente		1,6b	1,5c	1,8a	1,4e	1,5c

A : Argile, LF : Limons fins, LG : Limons grossiers, SF : Sables fin, SG : Sables grossiers
Les chiffres suivis de la même lettre dans la même ligne ne sont pas significativement différents au seuil de p = 0.05 selon le test de Scheffé

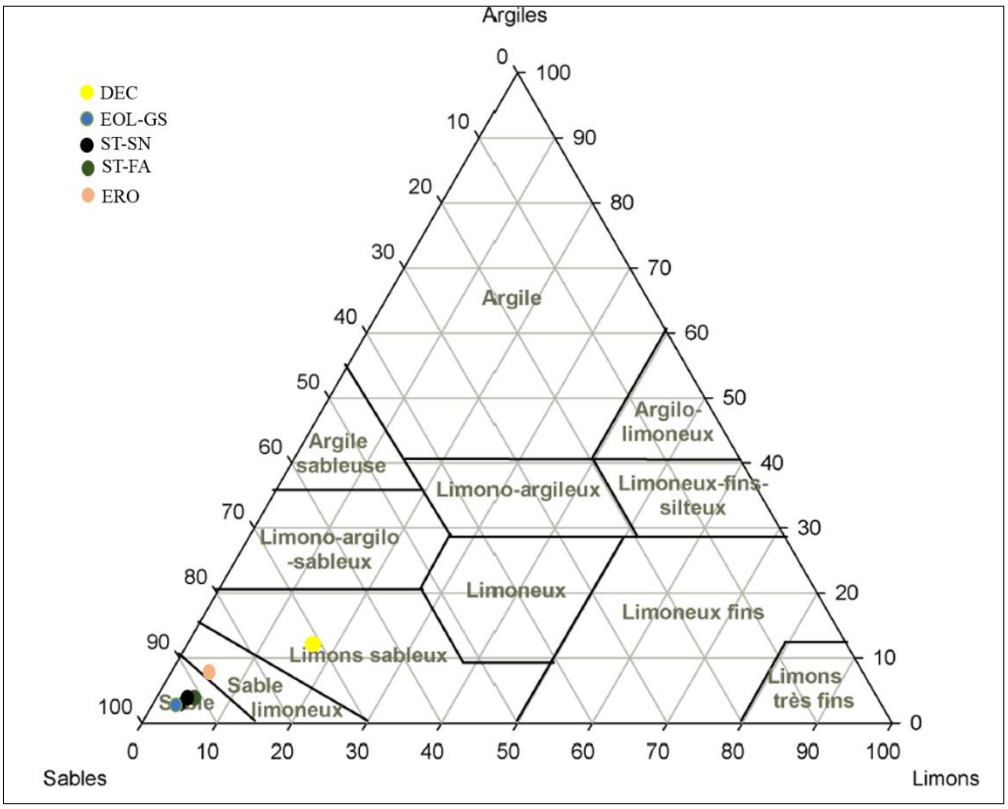


Figure 52: classe de texture des entités de surface du sol sur le site de Banizoumbou

Les teneurs en carbone et en azote totaux obtenues sur l'ensemble des surfaces sont relativement basses, comprises entre 2 et 9 g/kg pour le carbone et 0,1 et 0,6 g/kg pour l'azote. Des teneurs en carbone (9 g/kg) et en azote (0,6 g/kg) remarquablement élevées ont été mesurées sur les entités homogènes de surface de type DEC. Ces teneurs sont en effet

respectivement 3 à 4 fois et 1 à 6 fois plus élevées que celles obtenues sur les autres types de surface, à savoir ERO, ST-SN, EOL-GS et ST-FA (Tableau 19). Parmi ces derniers, seules les entités de type ST-FA montrent des valeurs significativement différentes et légèrement plus élevées (3 g/kg pour le carbone et 0,4 g/kg pour le l'azote).

Le rapport C/N varie en moyenne entre 7,8 et 19 pour l'ensemble des entités de surface du sol. L'entité de surface de type ST-FA montre la valeur moyenne de C/N la plus faible (tableau 19). Les valeurs de C/N les plus élevées concernent sur les sols des entités homogènes de type DEC et ST-SN.

Les teneurs moyennes en phosphore total sont très faibles et varie très peu sur l'ensemble des entités de surface (≤ 11 mg/kg ; tableau 19). Seule l'entité de type DEC présente une valeur significativement différente (11 mg/kg) comparée aux autres types de surface (<10 mg/kg ; tableau 19).

La somme des bases échangeables pour l'ensemble des entités homogènes de surface varie entre 0,3 et 1,3 Cmol(+).kg-1. Les teneurs en bases échangeables les plus élevées ont été mesurées dans les sols des entités de type DEC et ST-FA. Les autres entités homogènes de surface montrent des teneurs en bases échangeables quasiment identiques, variant entre 0,3 et 0,5 Cmol(+).kg-1.

La capacité d'échange cationique (CEC) pour l'ensemble des entités homogènes de surface varie entre 0,5 et 3 Cmol(+).kg^{-1}. Les entités de surface de type ST-SN et EOL-GS présentent les valeurs de CEC les plus faibles (0,5-07 Cmol(+).kg^{-1}. Ces valeurs reflètent les faibles teneurs en matière organique et en argiles observées au niveau de ces entités de surface du sol.La valeur de CEC la plus élevée (3 Cmol(+).kg^{-1}) est mesurée sur les sols des entités de surface de type DEC. Les teneurs en carbone et en argiles relativement élevées mesurées sur les surfaces de type DEC se traduisent par une valeur de CEC de 3 Cmol(+).kg^{-1}, la plus élevée.

Tableau 19: Teneurs en C, N, P et bases échangeables des EHS sur le site de Banizoumbou

	ERO	ST-SN	DEC	EOL-GS	ST-FA
pH eau	5,0b	5,5a	5,2a	5,5a	5,6a
C (g/kg)	1,7c	1,9c	8,8a	2,3c	3,1b
N (g/kg)	0,2c	0,1c	0,6a	0,2c	0,4b
C/N	8,5a	19,0a	14,7a	11,5a	7,8b
P mg/kg	<10a	<10a	11,0b	<10a	<10a
Ca Cmol(+).kg^{-1}	0,2b	0,2b	0,9a	0,3b	0,9a
Mg Cmol(+).kg^{-1}	0,1b	0,1b	0,3a	0,1b	0,2b
K Cmol(+).kg^{-1}	0,03a	0,04a	0,1b	0,1b	0,1b
Na Cmol(+).kg^{-1}	0,01a	0,01a	0,01a	0,01a	0,01a
Σbases échangeables Cmol(+).kg-1	0,3b	0,3b	1,3a	0,5b	1,1a
CEC Cmol(+).kg^{-1}	1,0c	0,5b	3,0a	0,7b	1,2a

Les chiffres suivis de la même lettre dans la même ligne ne sont pas significativement différents au seuil de p = 0.05 selon le test de Scheffé

L'analyse en composante principale réalisée sur les teneurs en azote, phosphore, carbone, bases échangeables, capacité d'échange cationique, pH eau, granulométrie et densité apparente et entités homogènes de surface indique que les deux axes expliquent 94,98% de la variance totale (figure 53). L'analyse de cette figure couplée à celle du tableau 20 montre que l'entité DEC et les paramètres tels que l'azote, le phosphore, le carbone, la capacité d'échange cationique, la densité apparente, les bases échangeables (K^+, Ca^{2+}, Mg^{2+}) et les teneurs en argile, en limon fin et grossier sont positivement corrélés à l'axe 1. En revanche, les entités ST-SN et EOL-GS et les teneurs en sable (fin et grossier) sont négativement corrélés à cet axe. L'entité ST-FA et le pH eau sont positivement corrélés à l'axe 2 tandis que ERO et Na sont négativement corrélé à cet axe.

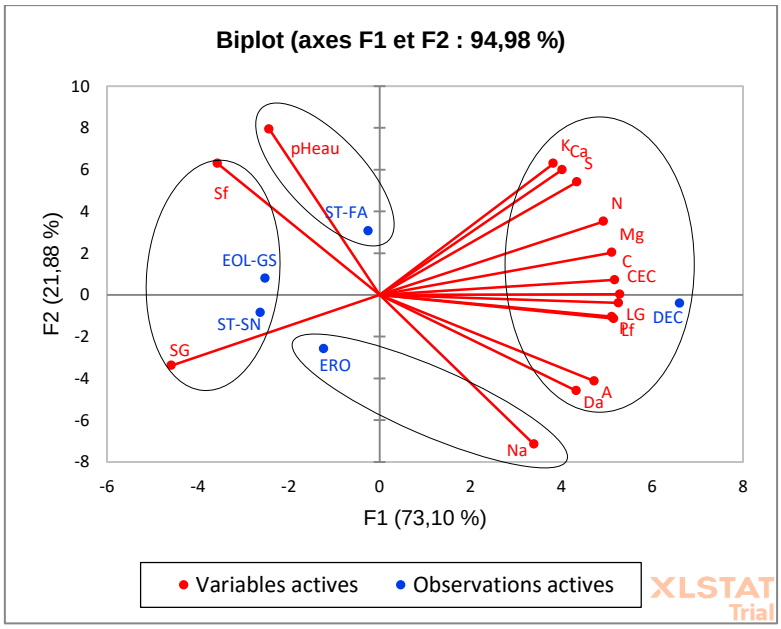


Figure 53: Analyse en composante principale entre les entités homogènes de surface du site de Banizoumbou et leurs caractéristiques physico-chimiques

Tableau 20: Valeurs des contributions et des cosinus² des entités homogènes de surface du sol et les paramètres des sols sur le site Banizoumbou. Les valeurs en gras des variables et des facteurs sont celles utilisées pour l'interprétation avec les axes canoniques

	F1		F2	
	Contribution	Cosinus²	Contribution	Cosinus²
ST-SN	11,741	**0,838**	4,171	0,089
DEC	74,749	**0,994**	0,934	0,004
ERO	2,581	0,168	38,115	**0,743**
ST-FA	0,104	0,006	53,219	**0,913**
EOL-GS	10,824	**0,734**	3,561	0,072
N	7,419	**0,868**	3,762	0,132
P	7,989	**0,934**	0,333	0,012
CEC	8,537	**0,998**	0,000	0,000
pHeau	1,804	0,211	19,246	**0,674**
C	8,174	**0,956**	0,157	0,005
Ca	4,935	**0,577**	10,967	0,384
K	4,468	**0,523**	12,068	0,423
Mg	7,985	**0,934**	1,258	0,044
Na	3,529	0,413	15,632	**0,547**
S	5,769	**0,675**	8,923	0,312
A	6,815	**0,797**	5,196	0,182
Lf	8,108	**0,948**	0,396	0,014
LG	8,453	**0,989**	0,045	0,002
Sf	3,876	**0,453**	12,072	0,423
SG	6,409	**0,750**	3,499	0,123
Da	5,730	0,670	6,446	0,226

b. Site de Sadoré (région de Tillabéri)

Les tableaux 21 et 22 présentent les caractéristiques physiques et chimiques des entités homogènes de surface du sol sur le site de Sadoré.

Les entités de surface rencontrées sur le site de Sadoré se caractérisent par une texture à dominance sableuse (figure 54). L'analyse de variance des teneurs en argiles, limons et sables et des densités apparentes ($p < 0,05$) montre des différences significatives et permettent de distinguer deux catégories d'entités de surface homogène (figure 55):

- les entités de surface à texture sableuse. Elles regroupent les entités de types ST-SN, EOL-GS, ERO et ST-FA. Elles se caractérisent par des densités apparentes comprises entre 1,3 et 1,6. Ces valeurs sont les plus faibles de toutes les EHS rencontrées sur ce site. Entre ces EHS, ERO représente la plus forte valeur de densité et EOL-GS la plus faible;
- les entités de surface à texture sablo-limoneuse. Elle concerne l'EHS DEC qui se caractérise par une densité apparente élevés (1,7). Cette valeur indique l'état d'un sol à mauvaise porosité.

Les valeurs moyennes de pH entre les catégories de surface distinguées ci-dessus montrent des différences qui sont significatives ($p < 0,05$). Elles varient entre des valeurs fortement acides au niveau des entités de type ERO et DEC (pH compris entre 5 à 5,5) et moyennement acides sur les entités ST-SN, EOL-GS et ST-FA (pH compris entre 5,5 et 6).

Tableau 21: Granulométrie et densité apparente des sols des entités de surface du sol sur le site de Sadoré

		ERO	ST-SN	DEC	EOL-GS	ST-FA
Argiles (%)	**A**	7,3a	4,0b	8,2a	3,4b	4,3b
Limons (%)	**LF**	1,6b	0,9b	2,8a	1,0b	1,2b
	LG	1,7a	2,9b	2,5b	1,2a	0,5c
Sables (%)	**SF**	48,1a	44,4a	49,0a	48,8a	49,7a
	SG	41,4a	47,8a	37,5b	45,6a	44,3a
Densité apparente		1,6b	1,5c	1,7a	1,3d	1,5c

A : Argile, LF : Limons fins, LG : Limons grossiers, SF : Sables fin, SG : Sables grossiers
Les chiffres suivis de la même lettre dans la même ligne ne sont pas significativement différents au seuil de p = 0.05 selon le test de Scheffé.

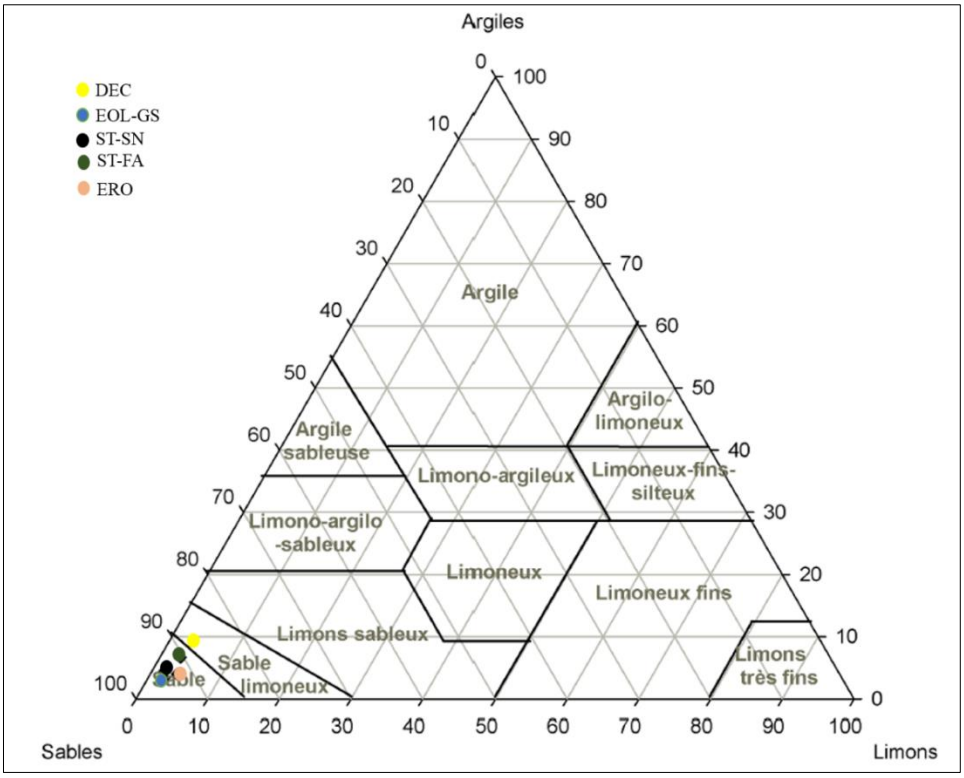


Figure 54: classe de texture des entités de surface du sol sur le site de Sadoré

Les teneurs en carbone organique de l'ensemble des EHS sont comprises entre 1,7 et 4,2 g/kg. Les valeurs obtenues sur les entités de type DEC sont de 4 g/kg. Ces valeurs sont significativement plus élevées que celles mesurées sur les autres EHS, notamment ST-FA (3,2 g/kg) et EOL-GS, ERO et ST-SN (2,3 ; 2,4 ; 1,7 g/kg) ($p < 0,05$).

La teneur en azote sur les EHS DEC (0,3 g/kg) est relativement plus élevée par rapport à celles des EHS EOL-GS et ST-FA (0,2 g/kg) et ERO (0,1 g/kg) ($p < 0,05$). Le rapport C/N varie peu entre les différentes entités de surface. Il est de 24 sur ERO qui montre les valeurs les plus élevées, contre 11,5 sur EOL-GS qui présente les valeurs les plus faibles. Les valeurs de C/N mesurées sur les surfaces DEC, ST-SN et ST-FA sont respectivement de 14 ; 17 et 16.

Les teneurs en phosphore total ne varient pas entre les différentes EHS ; elle est en dessous de 10 mg/kg sur l'ensemble des EHS ($p > 0,05$).

La somme des bases échangeables (S) pour l'ensemble des EHS varie entre 0,3 Cmol(+).kg^{-1}) et 0,8 Cmol(+).kg^{-1}) ($p < 0,05$). Elle est cependant plus élevée sur DEC (0,8 Cmol(+).kg^{-1}) et plus faible sur ERO et ST-SN (0,3 Cmol(+).kg^{-1}). Les EHS ST-FA, quant à elles, présentent des valeurs relativement importantes (0,6 Cmol(+).kg^{-1}) par rapport aux EOL-GS (0,4 Cmol(+).kg^{-1}).

La capacité d'échange cationique (CEC) reste aussi très basse sur l'ensemble des EHS avec des valeurs inférieures à 6 Cmol(+).kg^{-1}. Les valeurs mesurées au niveau des surfaces DEC (1,6 Cmol(+).kg^{-1}) et ERO (1,2 Cmol(+).kg^{-1}) sont les plus élevées ($p < 0,05$). Elles ne sont pas significativement différentes entre ST-FA, EOL-GS et ST-SN. Toutefois, ST-SN enregistre les plus faibles valeurs (0,5 Cmol(+).kg^{-1}).

Tableau 22: Caractéristiques physico-chimiques des EHS sur le site de Sadoré

	ERO	ST-SN	DEC	EOL-GS	ST-FA
pH eau	5,4a	5,6ab	5,4a	5,9b	5,7b
C g/kg	2,4c	1,7c	4,2a	2,3 c	3,2b
N (g/kg)	0,1c	0,1c	0,3a	0,2b	0,2b
C/N	24,0a	17,0a	14,0a	11,5a	16a
P g/kg	<10,0	<10,0	<10,0	<10,0	<10,0
Ca Cmol(+).kg^{-1}	0,1c	0,2c	0,5a	0,3b	0,4ab
Mg Cmol(+).kg^{-1}	0,1a	0,1a	0,1a	0,1a	0,2a
K Cmol(+).kg^{-1}	0,1a	0,1a	0,1a	0,1a	0,1a
Na Cmol(+).kg^{-1}	0,01a	0,0b	0,0b	0,0b	0,01a
Σbases échangeables Cmol(+).kg-1	0,3c	0,3c	0,8a	0,4c	0,6b
CEC Cmol(+).kg^{-1}	1,2a	0,5c	1,6ab	0,7c	0,8c

Les chiffres suivis de la même lettre dans la même ligne ne sont pas significativement différents au seuil de p = 0.05 selon le test de Scheffé

L'analyse en composante principale réalisée entre les teneurs en azote, phosphore, carbone, bases échangeables, capacité d'échange cationique, le pH eau, la granulométrie et la densité apparente et les entités homogènes de surface indique que les deux axes expliquent 85,25 % de la variance totale (figure 55). L'analyse de cette figure couplée à celle du tableau 23 montre que l'entité DEC et les paramètres tels que l'azote, le phosphore, le carbone, la capacité d'échange cationique, la densité apparente, les bases échangeables (Ca^{2+}, Mg^{2+}, Na^{+}) et les teneurs en argile, en limon fin sont positivement corrélés à l'axe 1. En revanche, les entités ST-SN et les teneurs en sable sont négativement corrélés à cet axe. L'entité ST-FA et EOL-GS et les paramètres de pH eau et le potassium (K^{+}) sont positivement corrélés l'axe 2 tandis que ERO et les limons grossiers sont négativement corrélé à cet axe.

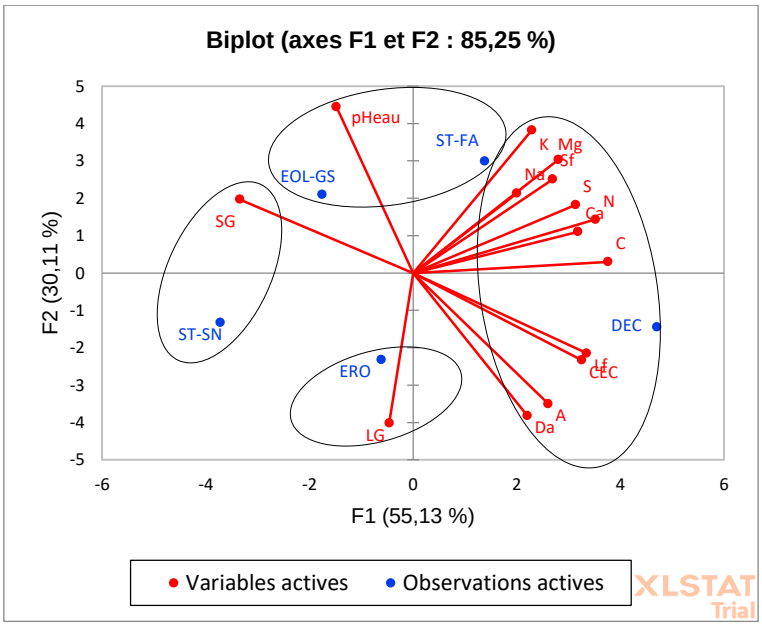


Figure 55: Analyse en composante principale entre l'azote, phosphore, carbone, bases échangeables, capacité d'échange cationique, le pH eau, la granulométrie et la densité apparente et les entités homogènes de surface sur le site de Sadoré

Tableau 23: Valeurs des contributions et des cosinus² des entités homogènes de surface du sol et les paramètres des sols sur le site de Sadoré. Les valeurs en gras des variables et des facteurs sont celles utilisées pour l'interprétation avec les axes canoniques

	F1		F2	
	Contribution	Cosinus²	Contribution	Cosinus²
ST-SN	33,506	**0,734**	7,743	0,093
DEC	53,526	**0,874**	9,244	0,082
ERO	0,906	0,035	23,893	**0,506**
ST-FA	4,627	0,166	39,593	**0,777**
EOL-GS	7,436	0,357	19,527	**0,512**
N	10,510	**0,869**	1,737	0,078
CEC	8,986	**0,743**	4,598	0,208
pHeau	1,863	0,154	16,763	**0,757**
C	12,007	**0,993**	0,075	0,003
Ca	8,579	**0,709**	1,031	0,047
K	4,443	0,367	12,353	**0,558**
Mg	6,658	**0,551**	7,791	0,352
Na	3,401	0,281	3,855	0,174
S	8,346	**0,690**	2,816	0,127
A	5,762	**0,476**	10,394	0,470
Lf	9,510	**0,786**	3,909	0,177
LG	0,179	0,015	13,673	**0,618**
Sf	6,158	**0,509**	5,343	0,241
SG	9,475	**0,784**	3,290	0,149
Da	4,123	0,341	12,372	**0,559**

5.3.2.2. Région de Maradi

a. Sites de Arraourayé

Les tableaux 24 et 25 présentent de façon singulière les caractéristiques physiques et chimiques des entités homogènes de surface du sol sur le site de Arraourayé.

Les entités de surface rencontrées sur le site de Arraourayé se caractérisent par une texture à dominance sableuse. L'analyse de variance des teneurs en argile, limons et sables et des densités apparentes ($p < 0,05$) montre des différences significatives et permettent de distinguer deux catégories d'entités de surface homogène (figure 56) :

- les entités de surface à texture sableuses. Elles regroupent les entités de types ST-SN, EOL-GS ST-F et ST-FA. Elles se caractérisent par des densités apparentes comprises entre 1,4 et 1,5. Ces valeurs sont les plus faibles de toutes les entités de surface rencontrées sur ce site ;
- les entités de surface à texture sablo-limoneuse. Elles comprennent les entités de surfaces de type DEC. Elles se caractérisent par des valeurs de densité apparente supérieures à 1,7. Ces valeurs de densité apparente sont les plus élevées de toutes les entités de surfaces répertoriées sur ce site.

Les valeurs moyennes de pH entre les catégories de surface distinguées ci-dessus montrent des différences qui sont significatives ($p < 0,05$). Elles varient entre des valeurs fortement acides au niveau des entités de type DEC (pH = 5,5) et moyennement acides sur les entités ST-SN, EOL-GS, ST-F et ST-FA sont moyennement acides (pH compris entre 5,9 et 6).

Tableau 24: Caractérisation granulométrique des sols des différentes sur le site de Arraourayé

		ST-SN	DEC	EOL-GS	ST-F	ST-FA
Argiles (%)	**A**	3,3b	6,8a	3,1b	2,9b	3,1b
Limons (%)	**LF**	1,0b	6,6a	0,7b	1,3b	0,7b
	LG	2,4b	6,4a	1,1b	1,6b	2,5b
Sables (%)	**SF**	37,1a	36,6a	39,6a	39,7a	38,7a
	SG	56,2a	43,7b	55,6a	54,5a	55,1a
Densité apparente		1,5b	1,7a	1,4c	1,5b	1,5b

A : Argile, LF : Limons fins, LG : Limons grossiers, SF : Sables fin, SG : Sables grossiers

Les chiffres suivis de la même lettre dans la même ligne ne sont pas significativement différents au seuil de p = 0.05 selon le test de Scheffé

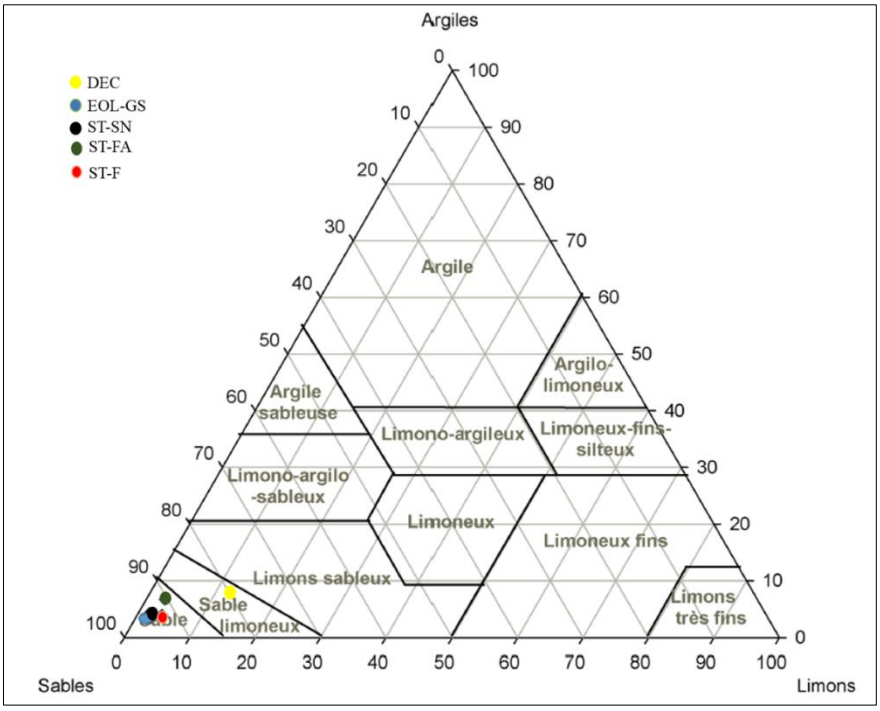


Figure 56: classe de texture des entités de surface du sol sur le site de Arraourayé

Les teneurs en carbone et en azote totaux obtenues sur l'ensemble des EHS sont relativement basses, comprises entre 2 et 6 g/kg pour le carbone et 0,1 et 0,4 g/kg pour l'azote. Des teneurs en carbone (6 g/kg) et en azote remarquablement élevées ont été mesurées sur DEC (6 g/kg pour le carbone et 0,4 g/kg) par rapport aux autres EHS. Ces teneurs sont en effet respectivement 3 à 4 plus importantes. En revanche, les teneurs les plus faibles ont été mesurées au niveau des EHS ST-SN, EOL-GS, ST-F et ST-FA pour le carbone (2 g/kg) et sur ST-SN pour l'azote (0,1 g/kg). Le rapport C/N ne présentent pas de différence significative entre les entités de surface. Il varie entre 11 et 16.

Les teneurs sont en phosphore sont en dessous de 10 mg/kg sur les EHS ST-SN, DEC, EOL-GS et ST-FA tandis que des valeurs de 10 mg/kg ont été mesurées sur ST-F.

La somme des bases échangeables pour l'ensemble des entités varie entre 0,5 et 2 Cmol(+).kg^{-1}. Ces valeurs sont globalement similaires à celles mesurées sur des sols typiques de la région par Issaka (2001). Les teneurs en bases échangéables les plus élevées ont mesurées sur DEC (2 Cmol(+).kg^{-1}). Les EHS ST-SN présentent les valeurs les plus faibles (0,5 Cmol(+).kg^{-1}).

La capacité d'échange cationique pour l'ensemble des EHS varie entre 0,6 et 2,4 Cmol(+).kg^{-1}. Les fortes valeurs ont été mesurées sur DEC (2,4 Cmol(+).kg^{-1}) et les plus faibles sur ST-SN (0,6 Cmol(+).kg^{-1}). Les teneurs en CEC sont similaires entre les EHS EOL-GS, ST-F et ST-FA (0,8 Cmol(+).kg^{-1}). Elles sont globalement similaires à celles mesurées sur des sols typiques de la région par Issaka, (2001)

Les valeurs des teneurs en bases échangeables et en capacité d'échange cationique reflètent les faibles teneurs en matière organique et en argiles observées au niveau des entités ST-SN, EOL-GS, ST-F et ST-FA. Inversement, les teneurs en carbone et en argiles relativement élevées mesurées sur les surfaces de type DEC se traduisent par leur niveau élevé en ces éléments.

Tableau 25: Caractéristiques physico-chimiques des EHS sur le site de Arraourayé

	ST-SN	DEC	EOL-GS	ST-FA	ST-F
pH eau	5,9a	5,5b	5,9a	5,8a	6,0a
C g/kg	1,6a	5,5b	2,2a	2,4a	2,3a
N (g/kg)	0,1a	0,4c	0,2ab	0,2c	0,2b
C/N	16,0a	13,8a	11,0a	12,0a	11,5a
P mg/kg	<10,0a	<10,0a	<10,0a	<10,0a	10,0b
Ca Cmol(+).kg^{-1}	0,3a	1,4b	0,4a	0,4a	0,4a
Mg Cmol(+).kg^{-1}	0,1a	0,4b	0,1a	0,1a	0,1a
K Cmol(+).kg^{-1}	0,1a	0,1a	0,1a	0,1a	0,1a
Na Cmol(+).kg^{-1}	0,01a	0,01a	0,01a	0,01a	0,02a
S Cmol(+).kg^{-1}	0,5a	2,0b	0,6b	0,6b	0,6b
CEC Cmol(+).kg^{-1}	0,6a	2,4c	0,7ab	0,8a	0,8a

Les chiffres suivis de la même lettre dans la même ligne ne sont pas significativement différents au seuil de p = 0.05 selon le test de Scheffé

L'analyse en composante principale réalisée entre les teneurs en azote, phosphore, carbone, bases échangeables, capacité d'échange cationique, le pH eau, la granulométrie et la densité apparente et les entités homogènes de surface indique que les deux axes expliquent 93,03 % de la variance totale (figure 57). L'analyse de cette figure couplée à celle du tableau 26 montre que l'entité DEC et les paramètres tels que l'azote, le carbone, la capacité d'échange cationique, la densité apparente, les bases échangeables (K^+, Ca^{2+}, Mg^{2+}) et les teneurs en argile, en limon fin et grossier sont positivement corrélés à l'axe 1. Par contre, l'entité ST-F et les teneurs en sable (fin et grossier) et le pH eau sont négativement corrélés à cet axe. Les

entités ST-FA, EOL-GS et ST-SN sont négativement corrélés l'axe 2 alors que le phosphore et Na^+ sont positivement corrélé à cet axe.

En conclusion, cette figure montre, d'une part, l'importance du complexe absorbant principalement favorable à la rétention des nutriments du sol sur les entités de zones de dépression à fortes densités apparentes dans les parcelles agricoles (DEC) et, d'autre part, la pauvreté des sols en nutriments en lien avec la forte teneur en particules grossières.

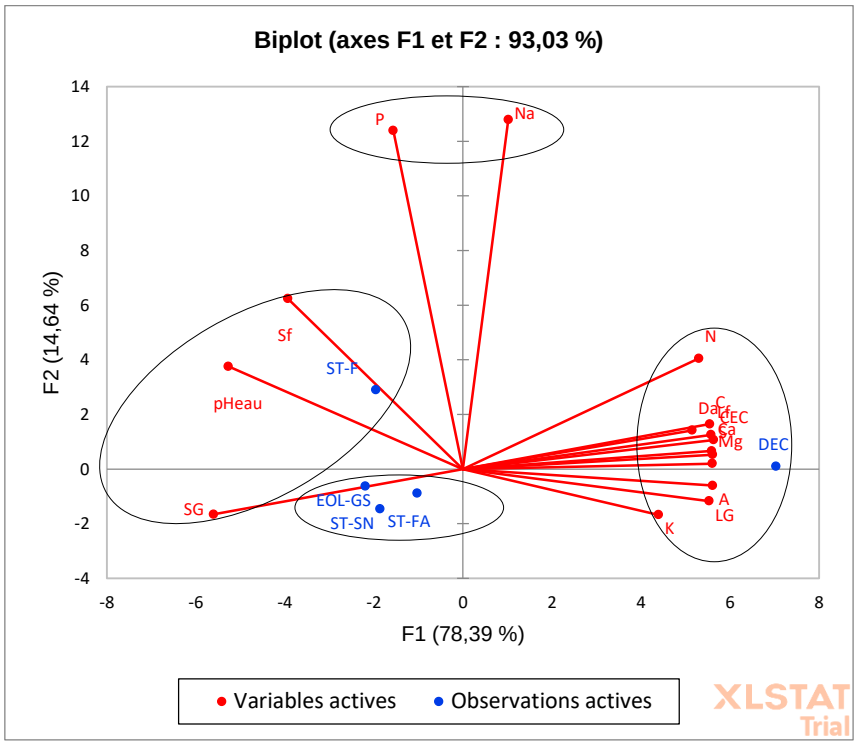


Figure 57: Analyse en composante principale entre l'azote, phosphore, carbone, bases échangeables, capacité d'échange cationique, le pH eau, la granulométrie et la densité apparente et les entités homogènes de surface sur le site de Arraourayé

Tableau 26: Caractéristiques physico-chimiques des EHS sur le site de Arraourayé. Les valeurs en gras des variables et des facteurs sont celles utilisées pour l'interprétation avec les axes canoniques

	F1		F2	
	Contribution	Cosinus²	Contribution	Cosinus²
DEC	79,005	**0,734**	0,071	0,093
ST-F	6,110	**0,874**	71,490	0,082
ST-SN	5,537	0,035	18,238	**0,506**
ST-FA	1,672	0,166	6,806	**0,777**
EOL-GS	7,677	0,357	3,395	**0,512**
N	6,996	**0,877**	4,082	0,096
P	0,609	0,076	38,155	**0,894**
CEC	7,891	**0,990**	0,284	0,007
pHeau	6,907	**0,866**	3,504	0,082
C	7,648	**0,959**	0,673	0,016
Ca	7,776	**0,975**	0,108	0,003
K	4,815	**0,604**	0,700	0,016
Mg	7,811	**0,980**	0,010	0,000
Na	0,259	0,032	40,720	**0,954**
S	7,833	**0,982**	0,069	0,002
A	7,845	**0,984**	0,091	0,002
Lf	7,732	**0,970**	0,391	0,009
LG	7,619	**0,956**	0,344	0,008
Sf	3,851	**0,483**	9,687	0,227
SG	7,811	**0,980**	0,684	0,016
Da	6,598	**0,827**	0,499	0,012

b. Site de Tarna (région de Maradi)

Pour rappel deux types de sol ont été étudiés sur le site de Tarna : (i) les sols ferrugineux tropicaux (Arénosols Ferraliques) sur lesquels on observe les EHS de type ST-SN, ST-FA et ST-F et (ii) les sols alluviaux du *Goulbi* de Maradi (Gleysols) avec la présence des EHS de type DEC-AL et DEC-AL-FA.

Les tableaux 27 et 28 présentent les résultats des analyses physico-chimiques des sols prélevés sur l'ensemble des EHS rencontrés sur ce site. L'analyse de variance des teneurs en argile, limons et sables et des densités apparentes montre qu'il n y a pas de différences significatives ($p > 0,05$) au sein des ESH d'un même type de sol. La figure 58 indique que la texture est sableuse à densité apparente comprise entre 1,4 et 1,5 sur l'ensemble des EHS des sols ferrugineux tropicaux, la lecture est limoneuse à densité

comprise entre 1,8 et 1,9 sur les EHS des sols alluviaux. La différence se trouve cependant entre les EHS d'un type de sol à un autre.

Les valeurs de pH eau des sols sur l'ensemble des EHS sont dans le même ordre de grandeur quel que soit le type de sol. Ces valeurs indiquent des sols faiblement acides (pH compris entre 6,1-6,5).

Tableau 27: Caractérisation granulométrique des sols des différentes sur le site de Tarna

		Sols ferrugineux tropicaux			Sols alluviaux de Goulbi	
		ST-SN	**ST-FA**	**ST-F**	**DEC-AL**	**DEC-AL-FA**
Argiles (%)	A	3,4b	5,6b	4,8b	20,3a	25,4a
Limons (%)	**LF**	3,4b	1,4b	1,1b	13,1a	15,2a
	LG	2,0b	3,6b	3,7b	23,5a	18,5a
Sables (%)	**SF**	43,7b	43,5b	45,4b	37,8a	35,9a
	SG	50,2b	45,8b	45,0b	5,3a	5,1a
Densité apparente		1,4b	1,5b	1,5b	1,8a	1,9a

A : Argile, LF : Limons fins, LG : Limons grossiers, SF : Sables fin, SG : Sables grossiers
Les chiffres suivis de la même lettre dans la même ligne ne sont pas significativement différents au seuil de p = 0.05 selon le test de Scheffé

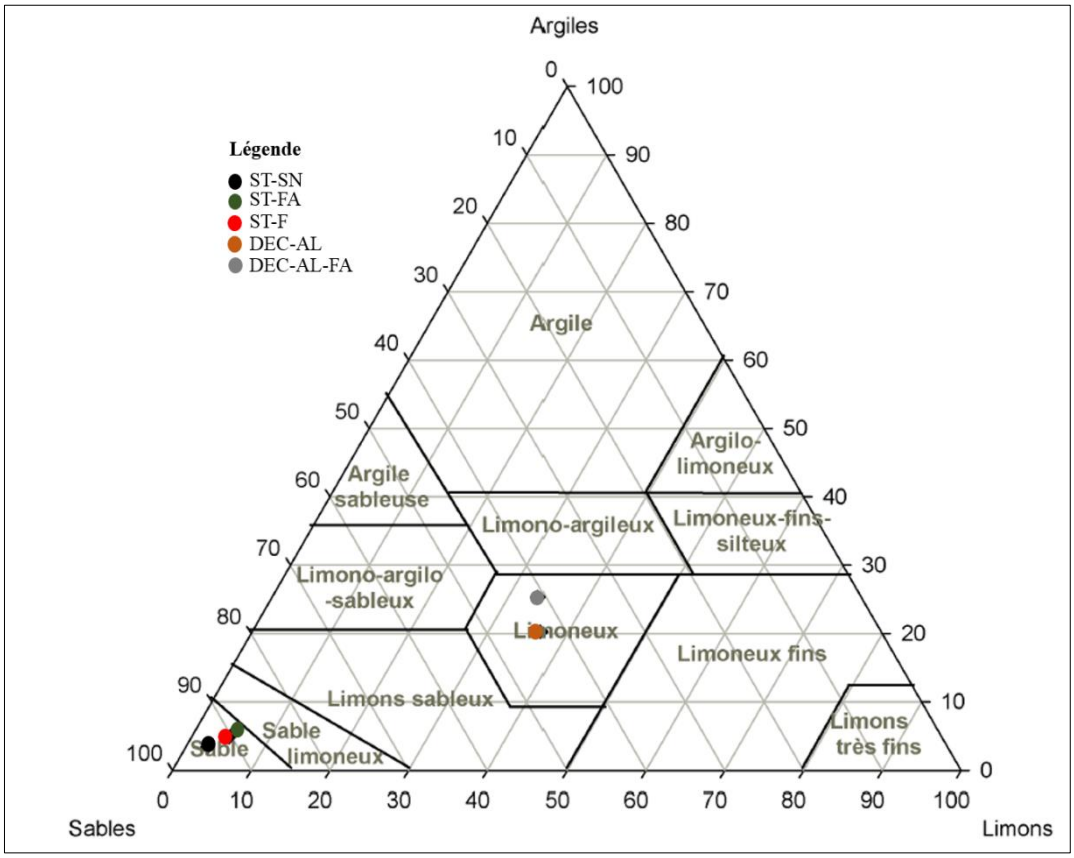


Figure 58: classe de texture en fonction des entités de surface du sol sur le site de Tarna

Les teneurs en carbone et en azote totaux obtenues sont relativement très basse compris entre 1,8 et 3,3 g/kg pour le carbone et 0,2 et 0,4 g/kg pour l'azote au niveau des EHS sur les sols ferrugineux tropicaux. Sur ce type de sol, les teneurs ne présentent pas de différences significatives. Toutefois, les moyennes sont relativement plus élevées sur ST-FA et ST-F pour le carbone que sur ST-SN. Au niveau des sols alluviaux de *Goulbi* Maradi, les surfaces DEC-AL-FA présentent des teneurs en carbone et azote totaux plus importantes que l'EHS DEC-AL. Les teneurs sont moyennes sur DEC-AL-FA (12,7 g/kg pour le carbone et 1,1 g/kg pour l'azote) et basses sur DEC-AL (8,0 g/kg pour le carbone et 0,5 g/kg pour l'azote). Les EHS sur les alluvions *Goulbi* Maradi présentent des valeurs en carbone et azote totaux plus élevées que celles des EHS des sols ferrugineux tropicaux. Le rapport C/N varie entre 8,25 et 15,5 sur les EHS des sols ferrugineux tropicaux et 11,53 et 16 sur les EHS des sols alluviaux.

Les teneurs en phosphore ne présentent pas de différence significative entre les EHS ST-SN, ST-F et ST-FA sur les sols ferrugineux tropicaux. Elles varient entre 10 et 13 mg/kg. Cependant les valeurs moyennes sont plus importantes sur ST-F et ST-FA (13 mg/kg). Sur les sols alluviaux du Goulbi, la teneur en phosphore se trouve à un niveau élevé sur DEC-AL-FA (26 mg/kg) alors le niveau est moyenne sur DEC-AL (11 mg/kg). Les valeurs moyennes sont presque deux fois supérieures sur DEC-AL-FA (26 mg/kg) par rapport aux autres EHS.

La somme des bases échangeables varie entre 1 et 1,9 Cmol(+).kg^{-1} sur les EHS des sols ferrugineux tropicaux. Sur ces sols, elle est plus importante au niveau des EHS ST-FA (1,9 Cmol(+).kg^{-1}) et ST-F (1,6 Cmol(+).kg^{-1}). Elle varie entre 8,9 Cmol(+).kg^{-1} sur DEC-AL et 13,9 Cmol(+).kg^{-1}) sur DEC-AL-FA sur les alluvions de *Goulbi* Maradi.

La capacité d'échange cationique varie entre 1,2 Cmol(+).kg^{-1}) et 1,9 Cmol(+).kg^{-1}) sur les EHS des sols ferrugineux tropicaux. Elle est plus importante sur ST-FA (1,9 Cmol(+).kg^{-1}) et ST-F (1,7 Cmol(+).kg^{-1}) que sur ST-SN. La capacité d'échange cationique varie entre 9,9 Cmol(+).kg^{-1} sur DEC-AL et 14,3 Cmol(+).kg^{-1}) sur DEC-AL-FA sur les sols alluviaux du *Goulbi* Maradi.

Tableau 28: Caractéristiques physico-chimiques des EHS sur le site de Tarna

	ST-SN	ST-FA	ST-F	DEC-AL	DEC-AL-FA
pHeau	6,4a	6,3a	6,5a	6,4a	6,5a
C%	1,8c	3,3c	3,1c	8,0b	12,7a
N (g/kg)	0,2c	0,4c	0,2c	0,5b	1,1a
C/N	9,0c	8,25	15,5c	16,0b	11,53a
P mg/kg	10,0b	13,0b	13,0b	11,0b	26,0a
Ca Cmol(+).kg^{-1}	0,7c	1,4b	1,0bc	6,9b	11,1a
Mg Cmol(+).kg^{-1}	0,2a	0,3c	0,4c	1,8b	2,2a
K Cmol(+).kg^{-1}	0,1a	0,2b	0,2b	0,3b	0,6
Na Cmol(+).kg^{-1}	0,0c	0,01b	0,01b	0,04a	0,04a
S Cmol(+).kg^{-1}	1,0d	1,9c	1,6c	8,9b	13,9a
CEC Cmol(+).kg^{-1}	1,2d	1,9c	1,7c	9,3b	14,3a

Les chiffres suivis de la même lettre dans la même ligne ne sont pas significativement différents au seuil de p = 0.05 selon le test de Scheffé

- **Analyse en composante principale prenant en compte les entités de surfaces des deux types de sols à Tarna**

L'analyse en composante principale réalisée entre les teneurs en azote, phosphore, carbone, bases échangeables, capacité d'échange cationique, le pH eau, la granulométrie et la densité apparente et les entités homogènes de surface indique que les deux axes expliquent 96,91 % de la variance totale (figure 59). L'analyse de cette figure couplée à celle du tableau 29 montre que les entités DEC-AL et DE-AL-FA et les paramètres tels que l'azote, le carbone, la capacité d'échange cationique, la densité apparente, les bases échangeables (K^+, Ca^{2+}, Mg^{2+}, Na^+) et les teneurs en argile, en limon fin et grossier sont positivement corrélés à l'axe 1. Par contre, l'entité ST-F, ST-FA et ST-SN et les teneurs en sable (fin et grossier) et sont négativement corrélés à cet axe. Cela traduit en conséquence la richesse en nutriment des sols ou des EHS dont le sol est riche en particules fines et le complexe absorbant est bien développé.

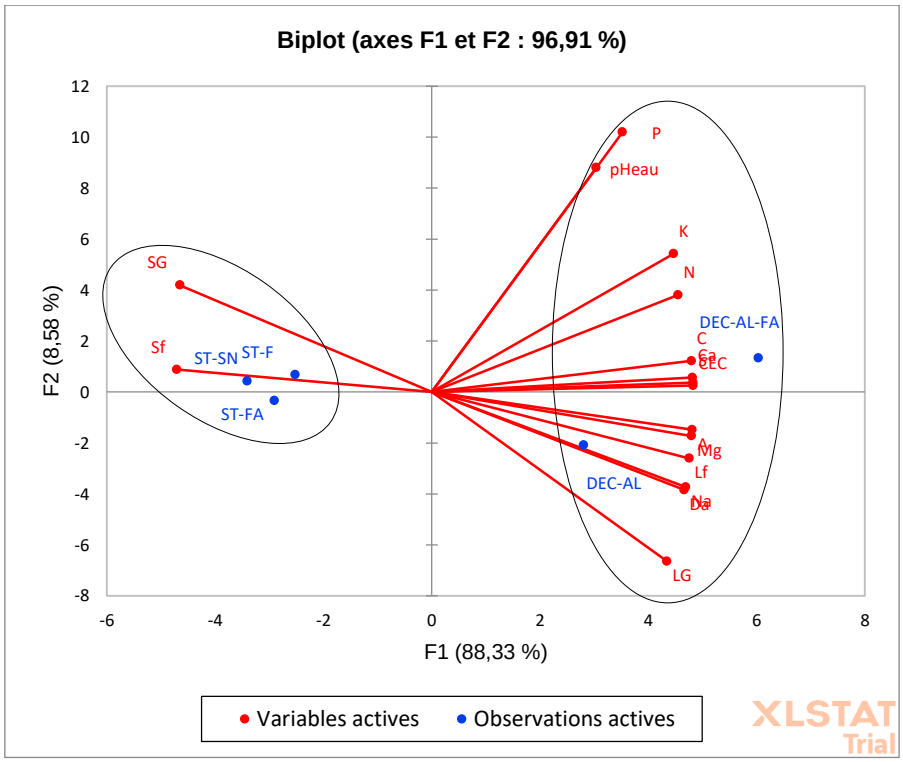


Figure 59: Analyse en composante principale entre l'azote, phosphore, carbone, bases échangeables, capacité d'échange cationique, le pH eau, la granulométrie et la densité apparente et les entités homogènes de surface sur les deux types de sol du site de Tarna

Tableau 29: Valeurs des contributions et des cosinus² des entités homogènes de surface du sol et les paramètres des sols sur les deux types de sol du site de Tarna. Les valeurs en gras des variables et des facteurs sont celles utilisées pour l'interprétation avec les axes canoniques

	F1		F2	
	Contribution	Cosinus²	Contribution	Cosinus²
ST-F	9,015	**0,863**	6,557	0,061
ST-SN	16,411	**0,964**	2,629	0,015
ST-FA	11,958	**0,841**	1,657	0,011
DEC-ALFA	51,482	**0,952**	25,711	0,046
DEC-AL	11,133	**0,637**	63,446	0,353
N	6,269	**0,886**	4,388	0,060
P	3,755	**0,531**	31,480	0,432
CEC	7,050	**0,996**	0,019	0,000
pHeau	2,792	**0,395**	23,430	0,321
C	6,965	**0,984**	0,450	0,006
Ca	7,022	**0,992**	0,096	0,001
K	6,037	**0,853**	8,894	0,122
Mg	6,976	**0,986**	0,901	0,012
Na	6,661	**0,941**	4,211	0,058
S	7,047	**0,996**	0,041	0,001
A	7,008	**0,990**	0,665	0,009
Lf	6,851	**0,968**	2,052	0,028
LG	5,716	**0,808**	13,358	0,183
Sf	6,719	**0,950**	0,233	0,003
SG	6,553	**0,926**	5,319	0,073
Da	6,580	**0,930**	4,462	0,061

5.3.3. Indices de risque de dégradation physique des sols des entités homogènes de surface des sites

Le tableau 30 présente l'indice de dégradation physique propre aux entités homogènes de surface du sol sur les sites d'étude. L'analyse de ce tableau montre que sur la base des critères établis par Piéri (1989), les entités de surface se classent comme suit :

- les entités de surface du sol qui ne présentent pas de risque immédiat de déstructuration (St > 9%) sont les entités ST-FA et EOL-GS des sites de Banizoumbou, Sadoré et Arraourayé ainsi que les ST-F du site Arraourayé (indices compris en moyenne entre 10 et 12 %) ;

- les entités de surface du sol qui présentent un risque élevé de déstructuration (St < 7 %) correspondent aux entités ST-SN de l'ensemble. Les horizons de ce type de surface sont instables avec des valeurs d'indice compris entre 6 et 7 % ;
- les entités de surface du sol déstructurées avec grande une sensibilité à l'érosion (St < 5 %) correspondent aux entités ERO des sites de Banizoumbou et Sadoré. Leurs indices sont compris entre 3 et 5 %.

L'indice de risque de dégradation physique des sols ne peut pas être appliqué aux entités de surface des sols alluviaux du Goulbi (Gleysols). Cet indice s'applique aux sols sableux à limono-sableux ayant des teneurs en éléments fin (argiles et en limon) inférieures à 15 % et de carbone et de seuil critique en matière organique situé entre 0 et 0,6 %. Or, les entités de surface des sols alluviaux du Goulbi présentent des teneurs en carbone supérieures aux valeurs critiques mais aussi en éléments fins supérieurs à 50 %. Les travaux de Pieri (1989) expliquent que ce type de sol ayant ces caractéristiques a un état physique très favorable à la stabilité structurale.

Tableau 30: Indice de risque de dégradation physique des sols des entités d'hétérogénéités de surface des sites d'étude

Sites	**Indice de risque de dégradation physique du sol des entités (%)**					
	ST-FA	EOL-GS	DEC	ST-SN	ERO	ST-F
Banizoumbou	10 ± 1	12 ± 5	8 ± 1	7 ± 1	3 ± 1	-
Sadoré	10 ± 3	10 ± 2	7 ± 1	6 ± 1	5 ± 1	-
Arraourayé	12 ± 4	10 ± 1	7 ± 1	6 ± 1	-	10 ± 1
Tarna	10 ± 3	-	-	7 ± 1	-	8 ± 3

« - » : EHS non identifiée sur le site

5.4. Discussion partielle

Le travail de cartographie réalisé sur l'ensemble des sites d'étude a révélé l'importance de l'hétérogénéité de surface du sol dans les champs cultivés. Cette hétérogénéité se manifeste sur de courtes distances par la présence mosaïque de diverses formes d'entités homogènes de surface (EHS). Le nombre de ces EHS, leur proportion et l'arrangement spatial sont des caractéristiques qui traduisent le degré d'hétérogénéité au sein d'un même champ.

Les résulats ont revelé que sur l'ensemble des sites, les entités de surface ST-SN représentent, sur le plan spatial, les surfaces les plus répandues dans les parcelles agricoles. Les entités associées au couvert agroforestier ou des ligneux telles que *Faidherbia albida* (ST-FA et DEC-AL-FA) et *Guiera senegalenis* (EOL-GS), occupent de très faible superficies dans les champs. Ceci est la conséquence de la pression accrue de l'homme sur les ressources végétales depuis plusieurs decenies (Souley Yéro, 2012 ; Descroix et Diedhiou, 2012)

Les résultats révèlent l'expansion des surfaces de croûte d'érosion (ERO) en l'occurrence sur les sites de la région de Tillabéri où ces surfaces constituent sur le plan spatial, la seconde entité la plus répandue dans les champs agricoles. Ces surfaces favorisent le ruissellement et l'érosion qui entrainent la diminution des surfaces cultivées (Bouzou *et al.,* 2011). Ces travaux confirment les résultats de plusieurs études qui ont montré l'expansion des croûtes d'érosion dans les parcelles agricoles en zone sahélienne et en particulier au Niger (Bouzou Moussa *et al.,* 2009 ; Descroix et Diedhiou, 2012 ; Souley Yéro, 2012 ; Abdourhamane Touré *et al.,* 2010, 2013 ; Hamadou Younoussa *et al.,* 2018).

Les entités de croûtes structurales autour des fourmilières sont des faciès de surface du sol répandus dans la région de Maradi. Ces surfaces occupent de faibles proportions dans les champs agricoles mais suffisantes pour induire un gradient d'hétérogénéité de surface du sol dans les parcelles agricoles. La présence de ces surfaces est surtout due à la disponibilité de la nourriture dans ces zones pour les fourmis. Cette disponibilité pourrait être due aux multiples associations des cultures ou la production du souchet qui garantit aux fourmis leur activité de récolte toute l'année.

Les résultats de la caractérisation des sols ont révélé que l'hétérogénéité de surface du sol a une influence significative sur les paramètres physico-chimiques des sols. A

l'intérieur d'un même champ, on note une différence de texture et des propriétés physico-chimiques des sols en fonction des EHS. Ces résultats corroborent plusieurs travaux de recherche qui ont montré la variabilité des propriétés des sols à l'intérieur des parcelles agricoles (Brouwer *et al.,* 1993 ; Gandah et al., 2000 ; Tourino-Soto, 2005 ; Weil et al., 2008 ; Tola *et al.,* 2017). Les EHS identifiées sur les sols alluviaux (Gleysols) du *Goulbi de Maradi* (entité de surface à croûtes de décantation sur alluvion DEC-AL et entité de surface à croûtes de décantation sur alluvion sous le houppier de *Faidherbia albida*, DEC-AL-FA sur le site de Tarna) présentent les meilleures caractéristiques physico-chimiques par rapport aux EHS sur les sols ferrugineux tropicaux des autres sites. En effet, ces sols sont présentés comme étant fertiles et surtout aptes aux cultures de contre saison (Issaka, 2001 ; Annou, 2002, FAO, 1998). Les résultats ont révélé cependant que les entités de surface du sol sur les Gleysols du site de Tarna présentent les plus fortes densités apparentes du sol, ce qui constitue une contrainte pour le travail du sol. Comme l'indique la FAO (1998), ces sols sont lourds et difficiles à travailler. Sur ce type de sol, l'entité DEC-AL-FA est la plus fertile sans doute en raison de sa richesse en débris organiques (herbacées et feuilles de *Faidherbia albida* qui abondent sous sa canopée).

Au niveau des sols ferrugineux tropicaux (Arénosols ferraliques) de l'ensemble des sites, les résultats ont révélé que sur les EHS à croûtes de décantation (DEC) sur les sites de Banizoumbou, Sadoré et Arraourayé présentent des caractéristiques du sol relativement similaires. Cette entité présente une texture limono-sableuse, des teneurs plus élevées en carbone, en phosphore, en azote, en bases échangeables et des capacités d'échange cationique par rapport aux autres EHS dans les parcelles agricoles. Ceci pourrait s'expliquer par leur topographie basse où convergent les pertes par érosion des surfaces environnantes. Ceci est cohérent avec les conclusions de Kaspar *et al (*2003*),* Kravchenko et Bullock (2000), Li *et al (*2001), Guo *et al* (2012) qui rapportent que les surfaces basses des champs agricoles sont le siège d'importantes accumulations des particules fines, de matière organique, et de nutriments entrainées par les eaux de ruissellement. Ces surfaces sont cependant fortement acides.

Les EHS ST-FA, ST-F et EOL-GS présentent, par ordre d'importance, les teneurs en nutriments relativement les plus élevés. L'aptitude de ces surfaces à concentrer les flux de nutriments

pourrait expliquer leur influence sur la qualité du sol (Bielders *et al.,* 2004 ; Dan Lamso *et al*., 2015a, 2015b; Farji-Brener et Werenkraut, 2017). Elles sont considérées comme des îlots de fertilité dans les parcelles agricoles (Bielders *et al.,* 2004).

Les résultats de l'indice de risque de dégradation physique ont montré que Les EHS ST-FA, ST-F et EOL-GS ne présentent aucun risque immédiat de dégradation de leur horizon de surface. Par contre, les EHS ERO et ST-SN sont considérées comme de faible fertilité par rapport aux autres EHS. Ces surfaces ont un risque très élevé de dégradation physique de leur horizon de surface. Ceci pourrait s'expliquer par le fait que ces surfaces sont constamment soumises à l'érosion, forme de dégradation des sols qui entraine le décapage de l'horizon de surface du sol et de leur fertilité (Bielders *et al.*, 2004 ; Bationo *et al.,* 2012).

5.5. Conclusion

L'hétérogénéité de surface du sol est une caractéristique majeure des champs agricoles au Niger. Elle se caractérise par l'occupation, à l'intérieur de ces champs, de diverses entités homogènes de surface du sol. Le travail de cartographie de l'hétérogénéité a permis, d'une part, de montrer la répartition de ces entités de surfaces dans les champs agricoles et, d'autre part, d'évaluer leur superficie et leur proportion surfacique à l'intérieur des champs. Concernant les sols ferrugineux tropicaux, sur l'ensemble des sites des régions de Tillabéri et Maradi, les entités de surface ST-SN sont celles qui représentent, sur le plan spatial, les plus importantes dans les champs. Elles représentent 73 à 98 % de la superficie totale des champs. Les entités de surface ERO occupent des proportions relativement importantes dans les champs cultivés de la région de Tillabéri (2 à 16 % de la superficie totale des champs). Les entités ST-FA, EOL-GS, DEC et ST-F occupent des proportions non négligeables dans les parcelles agricoles. Sur les sols alluviaux de Goulbi ou Gleysols (Tarna, région de Maradi), les résultats de la cartographie révèlent que les entités de surface DEC-AL sont les plus importantes dans les champs (81% de la superficie totale des champs).

L'hétérogénéité de surface du sol a une influence sur les paramètres physiques et chimiques des sols. Cette influence est marquée par la variabilité de la texture et des propriétés chimiques des sols des différentes EHS. Les EHS à croûte de décantation sur les sols ferrugineux tropicaux (DEC) et sur les sols alluviaux (DEC-AL et DEC-AL) semblent être les entités les plus fertiles dans les champs agricoles. Ces types d'entités concentrent les

teneurs les plus élevées en carbone, azote, phosphore, et bases échangeables et les plus fortes valeurs de capacité d'échanges cationique. Les résultats ont montré que les EHS telles ST-SN, ST-FA, ST-F, EOL-GS et ERO sont surtout caractérisées par leur texture grossière. Les analyses des sols ont révélé que les sols de ces EHS sont pauvres. Parmi ces entités, celles présentant les teneurs en éléments nutritifs les faibles sont les entités ERO et ST-SN.

Etant donnée l'influence de l'hétérogénéité de surface sur les propriétés des sols constaté dans les champs agricoles, il est important, d'une part, de comprendre son influence sur le comportement hydrodynamique des sols et d'autre part, d'évaluer son influence sur la production du niébé.

Chapitre 6 : Dynamique temporelle des états de surface et des propriétés hydrodynamiques en lien avec l'hétérogénéité de surface du sol

6.1. Introduction

Les propriétés hydrodynamiques des sols, en particulier celles liées à la conductivité hydraulique et à la rétention d'eau, ont fait l'objet de plusieurs travaux publiés au cours des dernières décennies dans la zone sahélienne (Vandervaere *et al.,* 1996,1997, Esteves et Lapetite, 2003, Esteves *et al.,* 2011; Malam Abdou, 2014 ; Malam Abdou *et al.,* 2015; Malam Abdou *et al.,* 2016; Malam Abdou, 2016 ; Savadogo *et al.,* 2017). Elles sont essentielles pour comprendre et caractériser le transfert d'eau et de matériaux à l'interface sol / atmosphère. Ces transferts reflètent la capacité du sol à stocker et à transporter de l'eau et des solutés, éléments essentiels pour la productivité des cultures (Malam Abdou *et al.,* 2015).

Dans la zone sahélienne, l'état de la surface du sol est un paramètre majeur expliquant la variabilité du régime hydrique des sols cultivés et non cultivés (Casenave et Valentin, 1989, 1992). L'évolution temporelle de l'état de surface du sol se manifeste de façon spectaculaire à travers le développement de croûtes superficielles et la réduction de l'infiltration de l'eau qui l'accompagne.

Dans cette partie, nous nous intéressons à la dynamique conjointe des états de surface et des propriétés hydriques des sols au sein des entités homogènes de surface (EHS). Notre approche méthodologique se base sur le suivi des états de surface et de l'état hydrique des sols, d'une part, de la mesure de la rétention en eau et de la conductivité hydraulique à saturation et d'autre part. Ces expérimentations ont été conduites en prenant en compte, d'une part, les stades phénologiques du niébé et, d'autre part, la hauteur de pluie cumulée et le travail du sol au cours d'un cycle cultural pendant les saisons 2015 et 2016. La figure 60 illustre le cumul pluviométrique tombé sur les sites en 2015 et 2016. On note une variabilité interannuelle de la pluviométrie sur l'ensemble des sites. Le site de Arraourayé a reçu moins de pluie par aux autres sites.

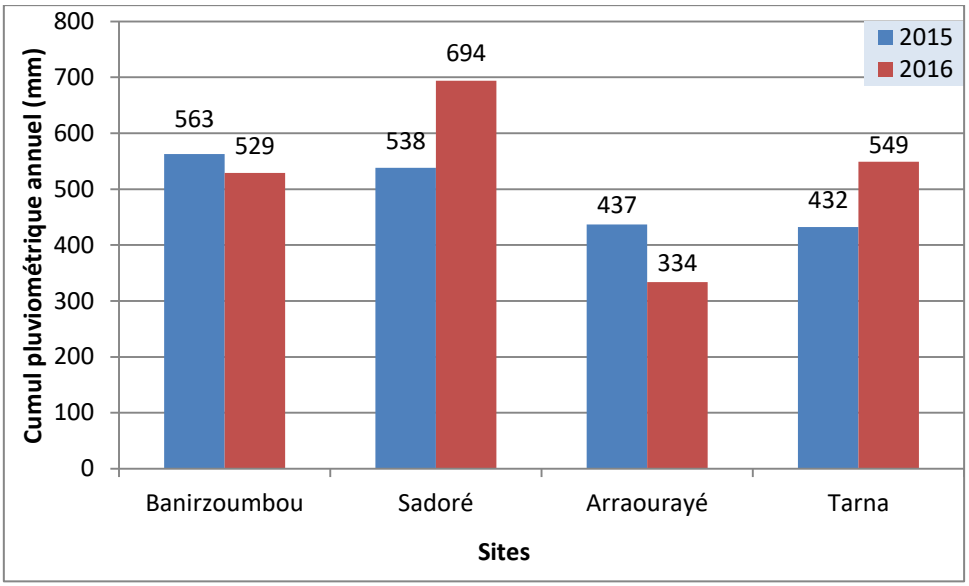


Figure 60: Cumul pluviométrique sur les sites pendant les saisons culturales 2015 et 2016

Seuls les résultats obtenus sur le site de Banizoumbou seront présentés en detail dans ce chapitre, ceux des autres sites se trouvent en annexe.

6.2. Matériel et méthodes

6.2.1. Suivi des états de surface (EDS)

Les suivis de l'évolution d'EDS ont été réalisés (i) à travers des relevé d'EDS réalisés *in situ* à l'échelle des EHS et (ii) à travers l'analyse d'images satellitaires en mesurant et analysant l'évolution temporelle de l'indice de végétation par différence normalisé (NDVI) à l'échelle du champ.

6.2.1.1. A l'échelle ponctuelle des EHS

Les paramètres relevés regroupent la nature et le taux de recouvrement de la surface du sol par les organisations pelliculaires, le couvert végétal et accessoirement les débris organiques.

Le suivi des EDS en fonction des stades phénologiques du niébé a été réalisé sur l'ensemble des EHS identifiées sur les sites de Banizoumbou.

Les mesures ont été réalisées sur 3 champs cultivées en niébé, sur chacune des 5 EHS répertoriées sur le site de Banizoumbou. Les parcelles suivies ont des dimensions variant entre 12,52 sur EOL-GS et 50,26 m² sur ST-FA.

Le suivi de l'évolution des EDS a été réalisé par la méthode des points quadrat. Cette méthode consiste à analyser les états de surface à l'intérieur d'un cadre de 1 m^2, subdivisé en 100 surfaces élémentaires de 100 cm² (figure 61). Le cadre métallique est placé au-dessus de la surface à analyser et l'état de surface dominant dans chaque unité de surface de 100 cm^2 est retenu comme caractéristique de la surface analysée.

Figure 61: Dispositif permettant le relevé des états de surface. Le cadre métallique mesure 1m x 1m. La mesure est effectuée dans une EHS de type DEC. Noter les structures desquamées caractéristiques des croûtes de décantation.

Le nombre des points d'observation des EDS a été adapté selon la taille et la forme géométrique des entités de l'EHS :

- Pour les entités homogènes de forme circulaire, le relevé des EDS a été effectué en distinguant quatre axes (Est, Ouest, Sud et Nord) en partant du centre de chaque entité (cf. fig.38a). Pour les entités de type ST-FA dont la surface varie de 28,27 à

50,26, le cadre métallique a été positionné en 12 emplacements sur chacun des axes. Pour les entités de type EOL-GS dont la superficie est de 12,56 m², le cadre métallique a été positionné en quatre emplacements au milieu des axes Est, Ouest, Sud et Nord définis en partant du centre (figure 62).

- Pour les entités de formes rectangulaires notamment ST-SN, ERO et DEC, le relevé des EDS a été effectuée en 13 emplacements réguliers le long de deux directions diagonales sur chaque entité (cf.fig 44c).

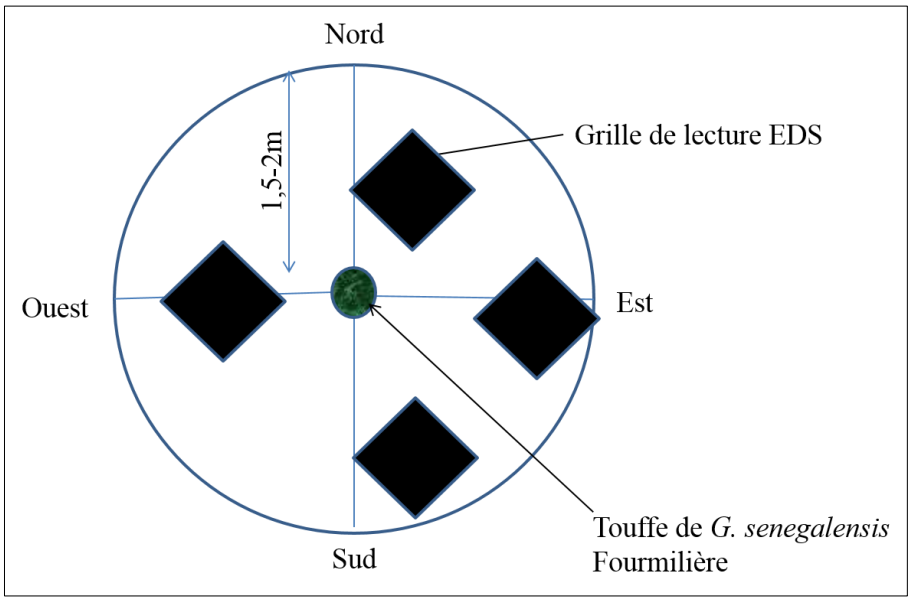


Figure 62: Principe de révélé des EDS sur les EHS circulaire de type EOL-GS et ST-F

6.2.1.2. A l'échelle des champs

Le suivi des EDS à l'échelle des champs a été réalisé grâce à l'utilisation des images Sentinel-2 optique en libre accès total avec une résolution spatiale de 10 m. Les informations détaillées relatives à ces données Sentinel-2 sont regroupées dans l'annexe 1. Nous avons utilisé 4 images Sentinel-2A dont les principales caractéristiques et les dates d'acquisition par site sont consignées dans le tableau 31. Ces images ont permis de réaliser un suivi temporel de l'indice de végétation par différence normalisé (NDVI) sur les 3 champs retenus sur le site de Banizoumbou (cf. Chapitre 4).

L'indice NDVI a été obtenu à partir des bandes radiométriques calculées pour chaque extrait d'image des séries temporelles et des fichiers de forme de contour des champs. Nous avons procédé à l'extraction des valeurs des pixels d'indice de chacun des champs dans le logiciel SNAP de l'ESA et nous avons exporté les données sous fichiers Excel pour leur analyse.

Tableau 31: Caractéristiques des images Optique Sentinel-2A utilisées

Site	Niveau	Zone géographique	Editeurs	Dates d'acquisition (2016)
Banizoumbou	L2A	N0207 R022 T31PDQ	Pôle Theia	08 et 28 Juillet 2016
	L2A	N0207 R022 T31PDQ	Pôle Theia	07 Août 2016
	L2A	N0207 R022 T31PDQ	Pôle Theia	06 Septembre 2016
	L2A	N0207 R022 T31PDQ	Pôle Theia	06 et 16 Octobre 2016

Les images sont prétraitées respectivement par (i) des corrections atmosphériques et des effets des pentes (Sen2Cor), (ii) un ré-échantillonnage des bandes à 10 m de largeur et enfin (iii) un découpage d'extraits d'images. Le traitement des données a été réalisé avec le logiciel SNAP de l'ESA. Le NDVI est construit à partir des canaux rouges (R) et proches infrarouge (PIR). L'indice de végétation normalisé met en valeur la différence entre la bande visible du rouge et celle du proche infrarouge.

$$NDVI = \frac{(PIR - R)}{PIR + R}$$

Cet indice est sensible à la vigueur et à la quantité de la végétation. Les valeurs du NDVI sont comprises entre -1 et +1, les valeurs négatives correspondant aux surfaces autres que les couverts végétaux, l'eau ou les nuages pour lesquelles la réflectance dans le rouge est supérieure à celle du proche infrarouge. Pour les sols nus, les réflectances étant à peu près du même ordre de grandeur dans le rouge et le proche infrarouge, le NDVI présente des valeurs proches de 0. Les formations végétales, quant à elles, ont des valeurs de NDVI positives, généralement comprises entre 0,1 et 0,7. Les valeurs les plus élevées correspondant aux couverts les plus denses. Dans le cadre de cette étude, nous avons choisi les valeurs extrêmes de NDVI étant donné que les valeurs de ces indices n'atteignent jamais les bornes -1 et +1.

6.2.2. Mesure de la capacité de rétention en eau

La rétention en eau d'un horizon correspond à sa capacité à retenir l'eau à un état hydrique donné, caractérisé par une valeur donnée du potentiel matriciel de l'eau dans le sol (Rabaud, 2011).

Les paramètres de potentiel matriciel utilisés dans le cadre de cette étude sont la capacité au champ et le point de flétrissement permanent. La capacité au champ correspond à l'eau retenue dans le sol après une période de pluie et un ressuyage par gravité de deux à trois jours. Elle correspond à la borne supérieure de la réserve en eau utile (RU) du solum. L'eau contenue entre la saturation et la capacité au champ séjourne dans le sol de manière trop fugace pour être considérée disponible pour les plantes. Sa traduction en potentiel matriciel pose un problème car il s'agit d'un état d'équilibre. Tout de même, les valeurs qu'on lui prête sont comprises entre 1,5 et 2,5. Les travaux de Bonneau (1961) dressent les normes pour le potentiel matriciel en fonction de la teneur en argile dans le sol. Les sols sur le site d'étude ont des teneurs en argile inférieures à 5%, le potentiel matriciel de la capacité au champ correspond à une valeur de -100 hPa ou un pF=2 (Tableau 32). Le point de flétrissement correspond à l'état hydrique du sol auquel les plantes ne peuvent plus puiser de l'eau. Le potentiel matriciel concerné est relativement uniforme et indépendant de la granulométrie ; le potentiel matriciel correspond à une valeur de -15 000 hPa ou un pF=4,2.

Tableau 32: Tableau des normes de pF utilisées pour déterminer le potentiel matriciel à la capacité au champ en fonction de la teneur en argile (d'après Bonneau 1961)

Argile (%)	**<5**	**5 à 40%**	**>40**
pF	2	2.5	3
Pression (hPa)	100	300	1000

Ces 2 mesures permettent de calculer la réserve utile qui est définie comme le volume d'eau compris entre la capacité au champ et le point de flétrissement (Combres *et al.,* 1999). Elle s'obtient par la formule suivante :

$$Ru = (Wcc - WpF4.2) \times Da \times z$$

Ru : réserve en eau utile (mm)

WpF2 : teneur en eau massique à la capacité au champ (g g^{-1})

WpF4.2 : teneur en eau massique au point de flétrissement permanent (g g^{-1})

Da : densité apparente du sol

Z : épaisseur de l'horizon de l'échantillon de sol prélevé (mm)

Les expérimentations ont été conduites dans le laboratoire de l'EA3795 GEGENAA sur des échantillons de sol non remaniés, prélevés durant les saisons culturales 2015 et 2016, à un état hydrique proche de la capacité au champ, sur l'ensemble des EHS du site de Banizoumbou. Au total, 60 échantillons dont 30 collectés par année, issus de l'horizon de surface (0-5 cm de profondeur), soit six échantillons par EHS, ont été analysés.

Le dispositif de mesure comprend deux chambres d'extractions de basse et haute pression. Celles-ci sont munies d'un tube d'évacuation d'eau et reliées à une bombonne de gaz sous pression (Argon). Un manomètre permet de faire varier la pression dans les chambres (figure 63).Le la méthode de mesure s'apparente à celle utilisée par Beriier (1979), Bruand *et al* (1996) et Ouattara *et al* (2006). Les échantillons à analyser, des agrégats de sol ou une certaine quantité de sol en l'absence d'agrégats pour les sols instables, sont placés dans des anneaux en caoutchouc, puis disposés sur des plaques poreuses en céramique préalablement saturées en eau. Ils sont ensuite lentement saturés en ajoutant de l'eau dans les anneaux avant d'être placés dans les chambres d'extraction. L'application d'une pression de -100 hPa (pF=2) permet d'évacuer l'eau gravitaire, ce qui correspond de la capacité au champ. Une pression de -15 000 hPa (pF=4.2) permet d'évacuer l'eau absorbable par les racines, ce qui correspond de point de flétrissement. Lors de l'expérimentation, les échantillons sont maintenus dans la chambre d'extraction deux jours pour les mesures à la capacité au champ et sept jours pour les mesures au point de flétrissement. Ces délais permettent d'atteindre un équilibre entre la force de pression et la force de rétention d'eau dans les échantillons. Les masses d'eau retenue par les échantillons à la capacité au champ et au point de flétrissement sont ensuite mesurées par pesée avant et après séchage à 105°C durant 24 heures.

Figure 63: Dispositif de mesure de rétention en eau du sol au laboratoire

6.2.3. Suivi de la teneur en eau par différence normalisée (NDWI)

L'indice de différence normalisée (NDWI) est une mesure de réflectance, sensible aux changements de la teneur en eau du couvert végétal. Ces valeurs augmentent avec l'augmentation de la teneur en eau. L'indice varie de -1 (sécheresse sévère) à 1 (bonne humidité). La plage courante pour la végétation verte est comprise entre 0,02 et 0,6. Les applications comprennent la gestion des cultures agricoles, la surveillance du couvert forestier et la détection de végétation stressée.

Il est calculé à l'aide de la formule suivante :

$$NDWI = \frac{(NIR - SWIR)}{NIR + SWIR}$$

où NIR est la réflectance dans la bande proche infrarouge et SWIR la réflectance dans la bande infrarouge à courte longueur d'onde. Pour les données Sentinel-2, ces bandes sont respectivement la 8A et la 11, toutes deux de 20 m de résolution.

La réflectance dans la bande NIR est influencée par la structure interne des feuilles et la matière sèche de la plante. Le SWIR, lui, reflète les changements de la teneur en eau et la structure spongieuse de la mésophylle. Toutes choses étant égales par ailleurs, une valeur plus faible dans la bande SWIR traduit une plus grande teneur en eau. La combinaison des

deux bandes NIR et SWIR soustrait les variations dues à la structure interne de la plante et la matière sèche. La précision dans la détermination de la teneur en eau n'en est qu'améliorée. Le NDWI apporte une information capitale sur l'état hydrique des cultures.

A partir des bandes d'indices NDWI calculées pour chaque extrait d'image des séries temporelles de la saison culturale de 2016 et des fichiers de formes de contour des champs, les valeurs de NDWI de chaque pixels dans chacun des champs ont été extraites à l'aide du logiciel SNAP de l'ESA. Les données ont ensuite été exportées sous Excel pour leur analyse.

6.2.4. Mesure de la conductivité hydraulique à saturation (Ks)

La conductivité hydraulique (Ks) ou l'aptitude du sol à se laisser traverser par l'eau (Vandervaere, 1995) est un paramètre intrinsèque qui traduit la circulation de l'eau dans un sol à un instant donné. La variation de la conductivité hydraulique dans le sol renseigne sur l'évolution des propriétés hydrodynamiques du sol, en particulier celles affectant sa structure sous l'effet du climat et/ou de facteurs anthropiques (Malam Abdou *et al.,* 2015). Les phénomènes mis en jeu dans le transfert de l'eau en milieu poreux saturés sont décrits par la loi de Darcy (Darcy, 1856) dont l'expression, généralisée aux milieux saturés ou non, est :

$$q = -K(\theta)grad(H)$$

où q est le flux d'écoulement (L T^{-1}) ; K(θ) est la conductivité hydraulique, variant fortement en fonction de la teneur en eau volumique (L T^{-1}) et grad(H), le gradient de charge hydraulique.

La conductivité hydraulique à saturation a été mesurée *in situ* sur les différentes EHS du site de Banizoumbou. Le dispositif utilisé est un tensio-infiltromètre (figure 64), testé dans les sols sableux de l'Ouest du Niger par Malam Abdou *et al.,* (2015, 2017). Il est composé :

- d'un infiltromètre, constitué d'une embase de 8 cm de diamètre, d'un réservoir de 3 cm de diamètre et un système de Mariotte permettant la mise en dépression de l'eau. Il permet l'infiltration d'une colonne d'eau à la surface du sol avec une succion constante. Les essais sont réalisés à une pression de - 10 mm ce qui permet en absence de macroporosité, d'avoir des valeurs suffisamment proche de zéro pour garantir la saturation de tous les pores du sol et donc d'assimiler la conductivité mesurée à sa valeur à saturation, Ks ;

- d'un cylindre métallique (de 12 cm de hauteur et 8,5 cm de diamètre) enfoncé délicatement au niveau des différentes entités homogènes de surface du sol. Ce cylindre force un écoulement monodirectionnel vertical réduisant les incertitudes sur la détermination de la conductivité hydraulique (Vandervaere *et al.,* 2000). Contrairement à l'infiltromètre à double anneau ou infiltromètre de Muntz qui déstructure le sol et utilise beaucoup d'eau (Casenave et Valentin, 1989), le tensio-infiltromètre présente l'avantage d'imposer des pressions négatives. Dans ce cylindre sont enfoncés deux tensiomètres. Chaque tensiomètre est composé d'une bougie poreuse en céramique de 20 mm de longueur et 2,2 mm de diamètre, fixée à un tube capillaire semi-rigide lui-même connecté à un capteur de pression. Les bougies poreuses sont insérées dans le cylindre à 3 cm et 6 cm de profondeur dans le sol.

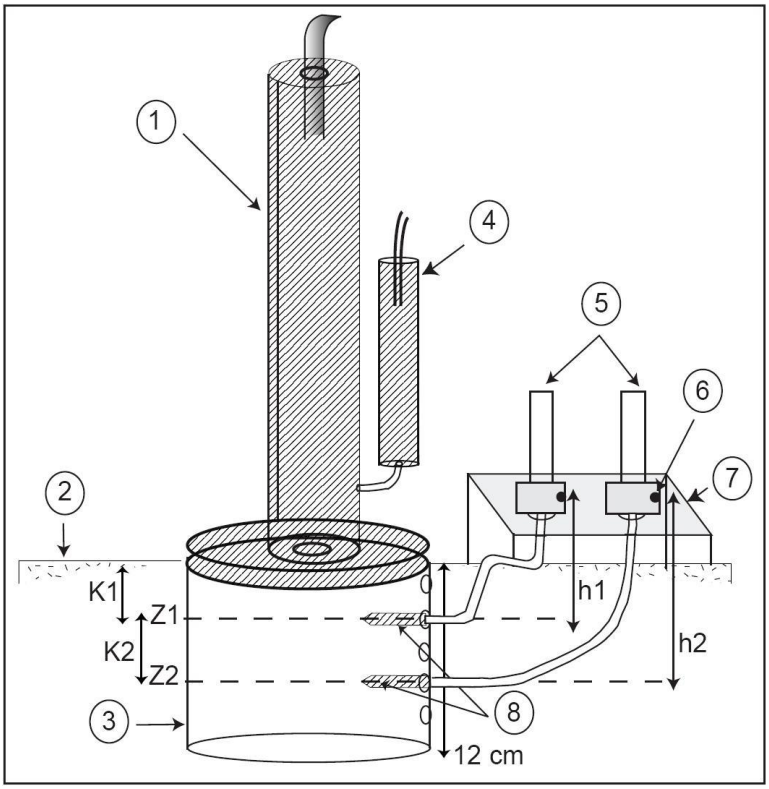


Figure 64: Dispositif de mesure de la conductivité hydraulique *in situ* (tensio-infiltrométrie)

1. Infiltromètre ; 2. Surface du sol ; 3. Cylindre (diamètre. 8,5 cm) ; 4. Système de réglage de la pression (vase de Marriotte) ; 5. Tubes tensiomètriques ; 6. Capteur ; 7. Support ; 8. Bougies poreuses.

Les mesures ont été conduites au cours des saisons culturales 2015 et 2016 dans le champ 1 représentatif du terroir de Banizoumbou. Les cylindres métalliques ont été installés sur les plages représentatives de chaque entité homogène de surface du sol.

Pour la caractérisation du Ks sur chaque EHS en début de saison culturale et avant le premier sarclage (à noter que le sarlage est effectué deux fois pendant la saison des pluies), quatre cylindres ont été installés le 30 juin 2015 et le 13 juillet 2016.

Pour suivre l'évolution temporelle de la conductivité hydraulique en fonction du travail du sol et du cumul des pluies, 6 paires de cylindres (12 cylindres) ont été installées sur chaque EHS en 2015 et 4 paires (8 cylindres) en 2016 après le sarclage. Ces paires de cylindres sont numérotées (figure 65). Les mesures de Ks ont été effectuées d'abord sur la première paire de cylindres après la première pluie depuis l'installation des cylindres, puis sur la deuxième paire de cylindres après la deuxième pluie et ainsi de suite jusqu'à la sixième paire de cylindres pour l'année culturale 2015 et la quatrième paire pour l'année culturale 2016.

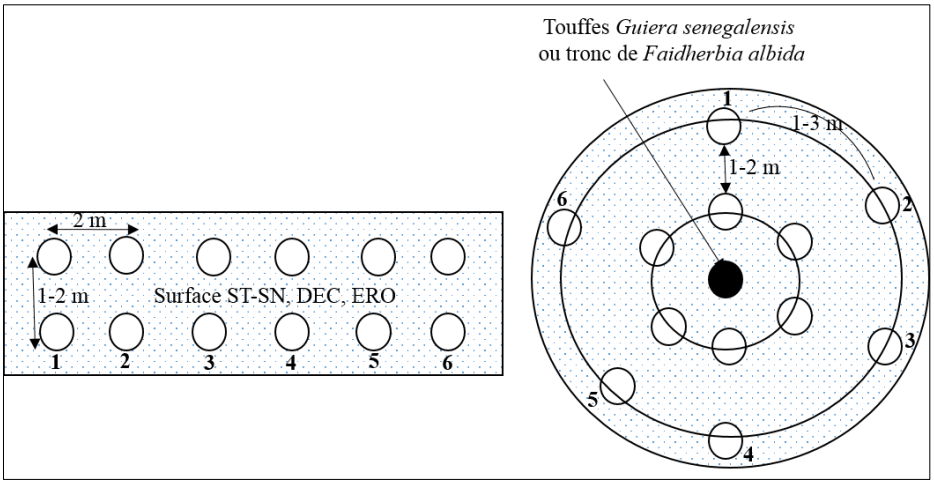


Figure 65: Schéma du dispositif de mesures temporelles de la conductivité hydraulique. Les ronds blancs représentent l'emplacement des cylindres.

La figure 66 illustre la mise en place des cylindres, le dispositif de mesure en place et la réalisation des mesures de la conductivité hydraulique.

Figure 66: Vue du dispositif de mesures sur le terrain. 1. mise en place du cylindre. Le cylindre est enfoncé à la main en exerçant une pression au moyen d'une plaque métallique légère 2. Vue du cylindre mis en place. 3. Vue d'ensemble du tensio-infiltromètre. 4. Opération de mesures de conductivité hydraulique à saturation en cours

6.3. Résultats

6.3.1. Dynamique des états de surface

Les figures 67 illustrent l'évolution des EDS au cours des différents stades phénologiques du niébé sur chaque EHS de site de Banizoumbou. Les autres sites sont en annexe 1.

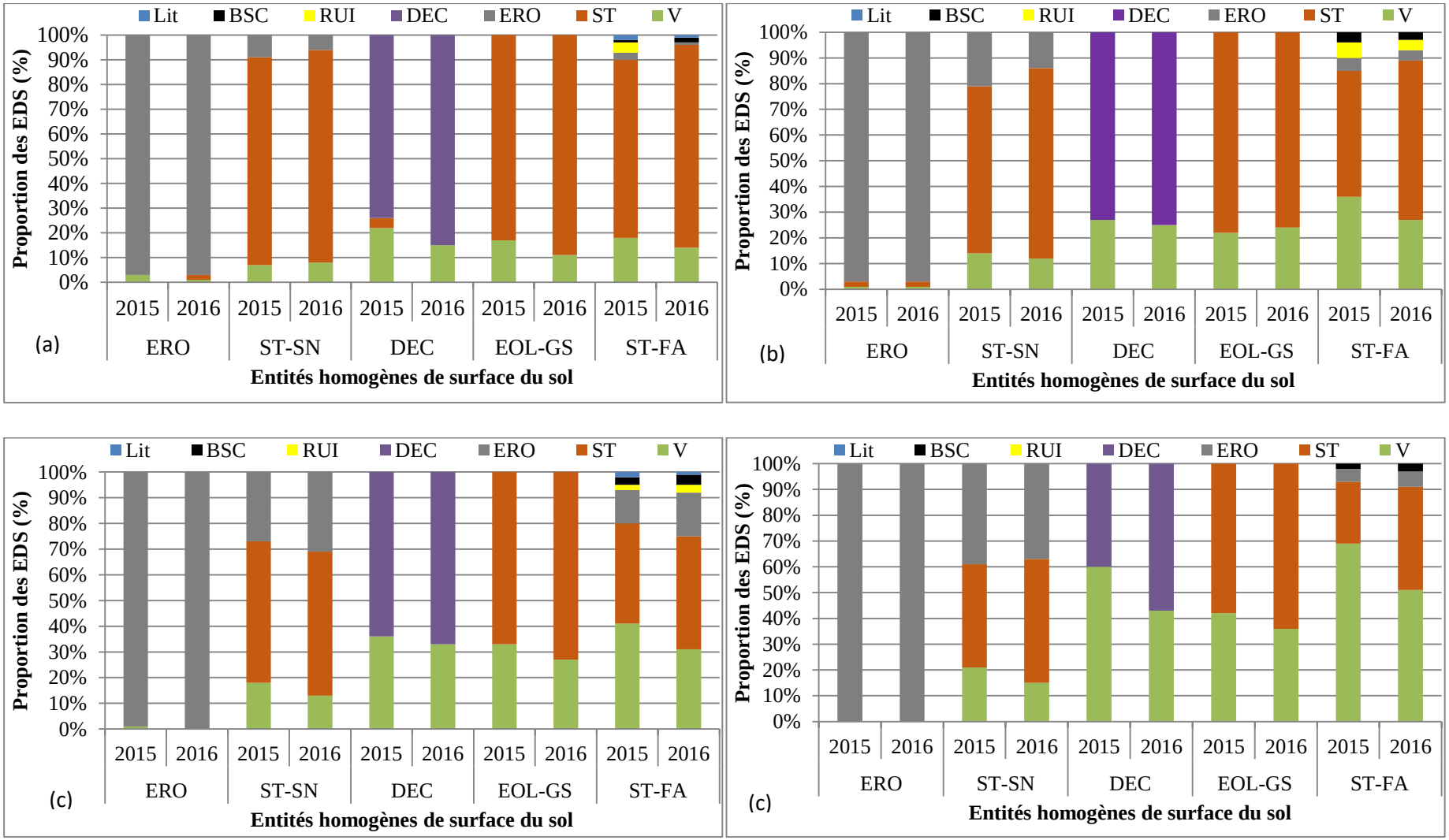


Figure 67: Evolution des EDS en fonction des EHS des stades phénologiques à Banizoumbou : (a) Levée ; (b) Ramification ; (c) Floraison ; (d) Maturité

ST : croûte structurale ; ERO : croûte d'érosion ; DEC : croûte de décantation ; RUI : croûte de ruissellement ; BSB croûte microbiotique ; Lit : litière ou débris végétaux ; V : végétation

L'analyse de ces figures montre une augmentation du taux du couvert végétal et la décroissance des encroûtements superficiels au cours de la saison culturale. Les relevés réalisés à la levée des cultures, avant les premiers sarclages, montrent des EDS caractéristiques d'un profil cultural de type C2 (porosité vésiculaire comprise entre 5 à 30%) avec un taux de recouvrement par la croûte structurale de 84 à 86 % sur les EHS de type ST-SN, 83 à 89 % sur le type EOL-GS, 72 à 82 % sur le type ST-FA. La croûte de décantation représente 74-85 % sur les EHS de type DEC qui ne présente que 4% de croûte structurale. La croûte d'érosion constitue 97 % des EHS de type ERO. Le taux de couvert végétal est relativement élevé (variant entre 11 et 22 %) et croissant au cours de la saison pour les EHS de type EOL-GS, DEC, ST-FA. Le taux de couvert végétal les plus faibles ont été obtenues sur ERO (1-3 % de recouvrement végétal) et ensuite ST-SN (7-8 %) en lien avec la mauvaise levée du niébé sur ces entités de surface.

Les stades de ramification, de floraison et de maturité se caractérisent par un développement relativement important de la végétation sur l'ensemble des EHS, à l'exception du type ERO. Cette croissance est plus importante par ordre decroissant sur les EHS de type ST-FA, EOL-GS et DEC. Elle est faible sur les EHS de type ST-SN où on assiste progressivement au développement de la croûte d'érosion (37-39 %). Sur les EHS de type ERO, le couvert végétal décroît voire disparaît à partir du stade de floraison. Ce type de croûte constitue une contrainte majeure au développement des cultures, en particulier aux stades de floraison et de maturité. L'évolution temporelle des EDS en fonction du travail du sol et du cumul de pluie reçue après sarclage présenté en annexe 2, montre la même tendance pour ce type de croûtes. Ceci traduit les limites du sarclage sur la strcuture du sol au cours de la saison des pluies. On constate un développement, quoique relativement faible, des croûtes microbiotiques ou biologiques en particulier sur les EHS de type ST-FA sur les sites de Banizoumbou.

Les images aériennes prises durant la phase de ramification montre le caractère hétérogène du développement des cultures à l'intérieur des champs agricoles (figure 68)

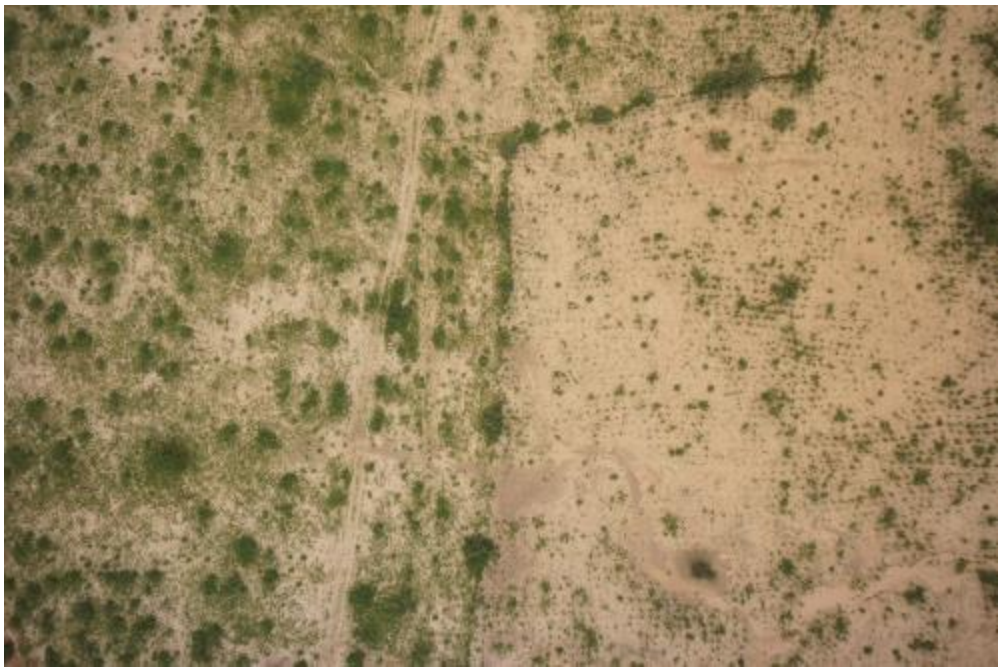


Figure 68:Image aérienne prise le 21 Août 2015 montrant l'hétérogénéité de la croissance des cultures durant la phase de ramification dans un champ de Banizoumbou

6.3.2. Caractérisation et suivi temporelle du NDVI

La figure 69, 70 et 71 illustrent la distribution spatio-temporelle du NDVI au cours de la saison culturale sur le site de Banizoumbou. Ces figures donnent un aperçu de l'hétérogénéité spatio-temporelle du NDVI.

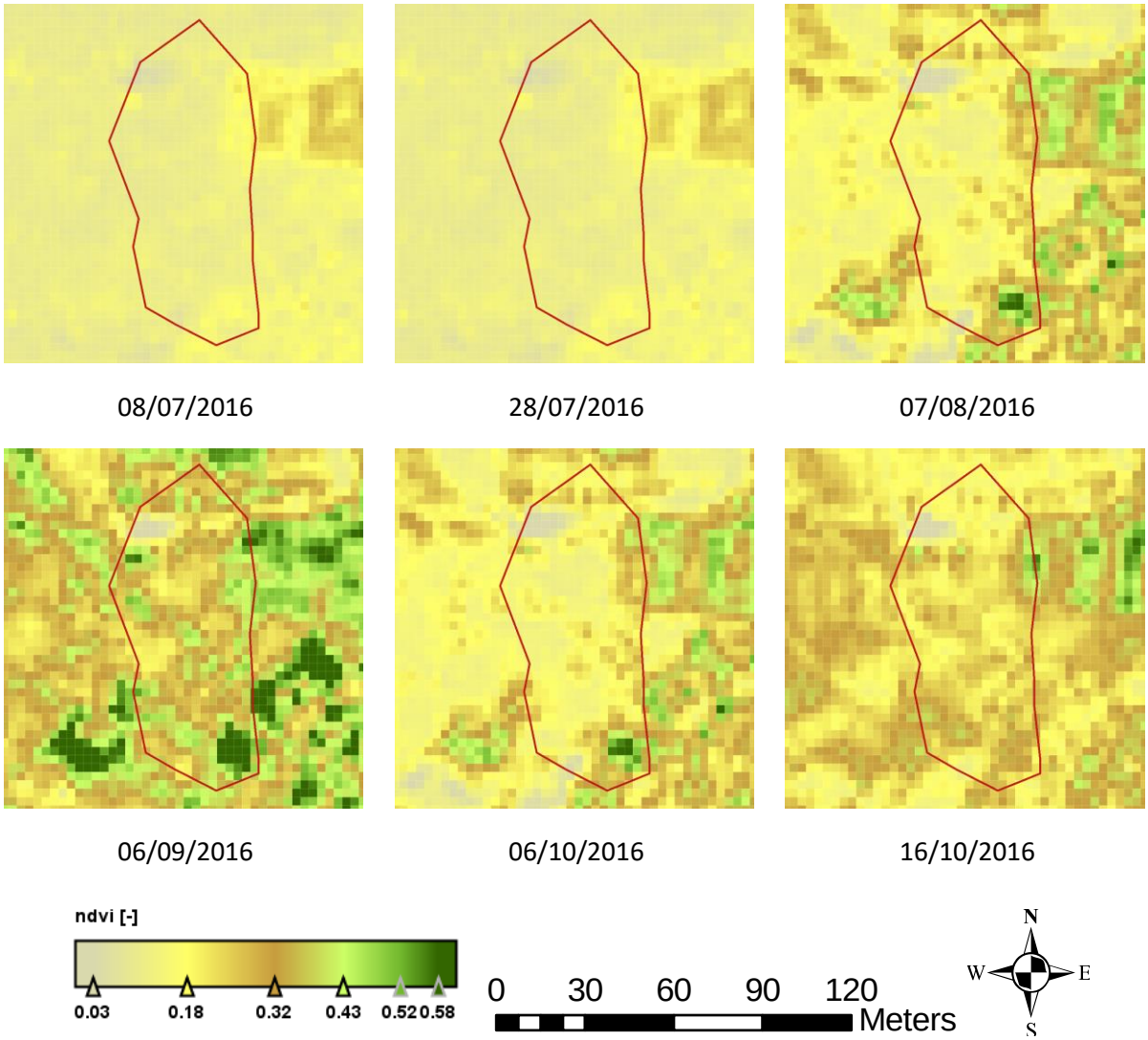


Figure 69: Dynamique temporelle du NDVI au cours de la saison culturale 2016

Le cadre rouge reprsente la limite du champ. Les valeurs proches de 0,03 correspondent aux sols nus et celles proche de 0,7 correspondent à une couverture végétale dense.

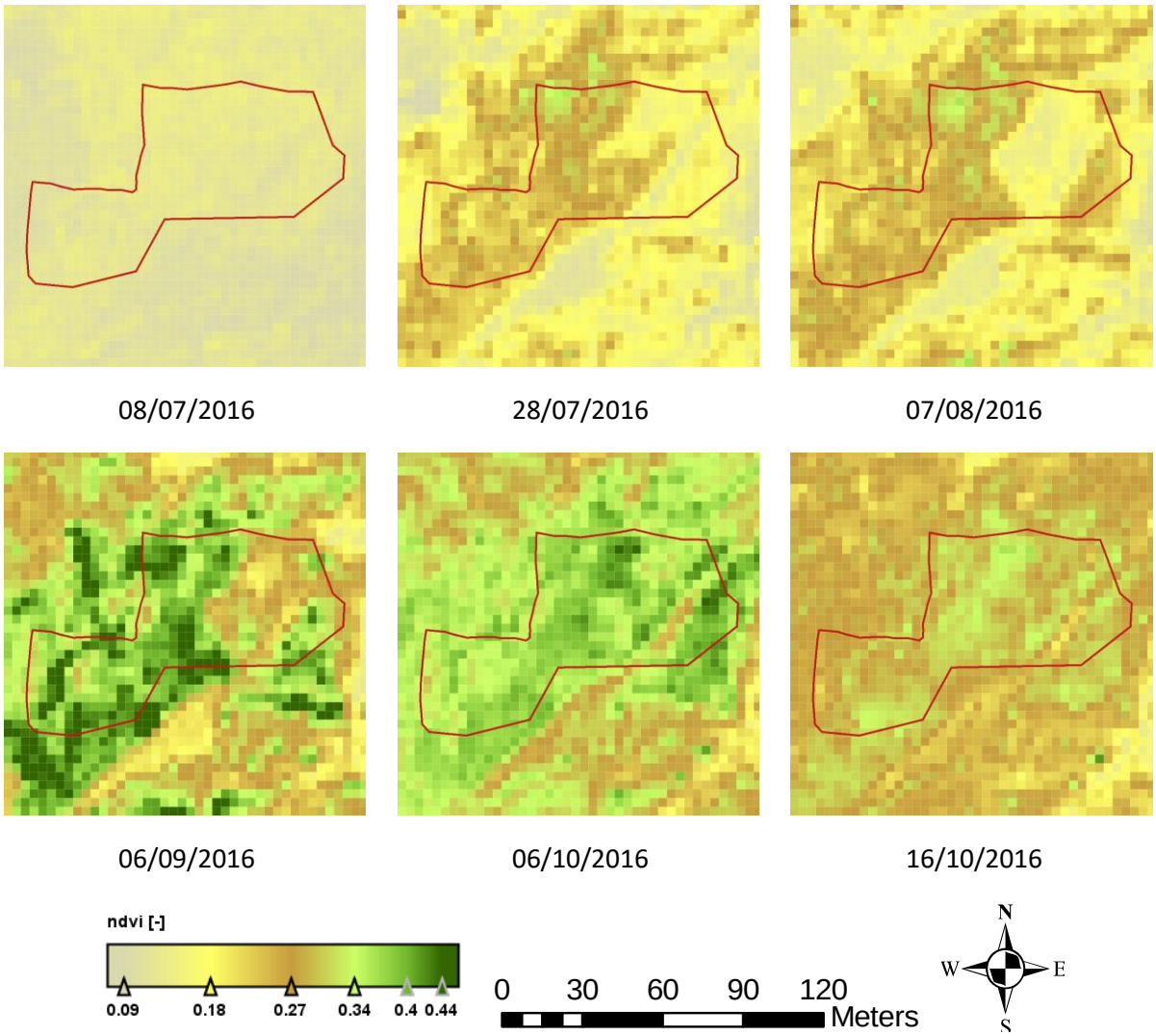


Figure 70: Dynamique temporelle du NDVI sur le champ 2 au cours de la saison culturale 2016

Le cadre rouge reprsente la limite du champ. Les valeurs proches de 0,03 correspondent aux sols nus et celles proche de 0,7 correspondent à une couverture végétale dense.

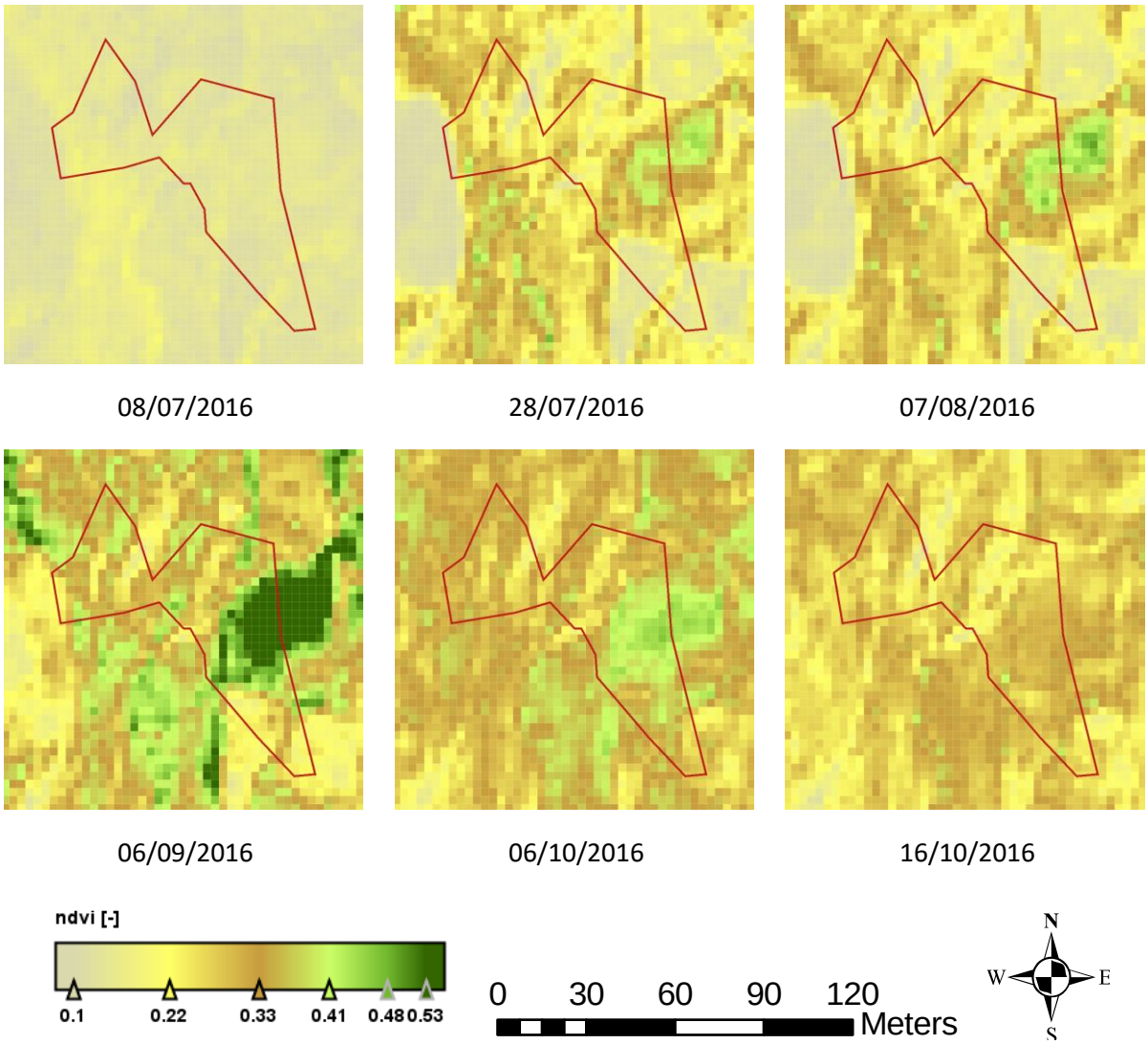


Figure 71: Dynamique temporelle du NDVI sur le champ 3 au cours de la saison culturale 2016

Le cadre rouge reprsente la limite du champ. Les valeurs proches de 0,03 correspondent aux sols nus et celles proche de 0,7 correspondent à une couverture végétale dense.

L'analyse de ces figures révèle l'hétérogénéité spatio-temporelle des indices de NDVI à l'intérieur et entre les champs agricoles. Les valeurs de NDVI dans les champs de Banizoumbou varient de 0,12 à 0,34 dans le champ 1, de 0,12 à 0,37 et enfin de 0,14 à 0,36 dans le champ 3 (Figure 72). Les valeurs de NDVI obtenues confirment la tendance de l'augmentation du recouvrement végétal et son état de vigueur en fonction des stades phénologiques lors des relevés des EDS. L'analyse de ces figures permet de constater sur l'ensemble des champs et des sites (annexe 2), une tendance relativement similaire de l'évolution de la NDVI au cours de la saison des pluies. L'analyse de ces figures révèle trois phases différentes :

- Une phase d'augmentation du NDVI allant de Juillet à Août. Elle correspond à l'installation des cultures et leur croissance jusqu'à la phase de ramification du niébé;
- Une phase sans augmentation ni diminution de NDVI de fin Août à Septembre. Cette phase correspond aux valeurs maximales de NDVI, liées au développement maximal et à la plus forte activité photosynthétique des cultures et des végétaux ;
- Une phase de diminution du NDVI à partir du mois d'Octobre. Cette période correspond à la phase de senescence et la récolte des cultures.

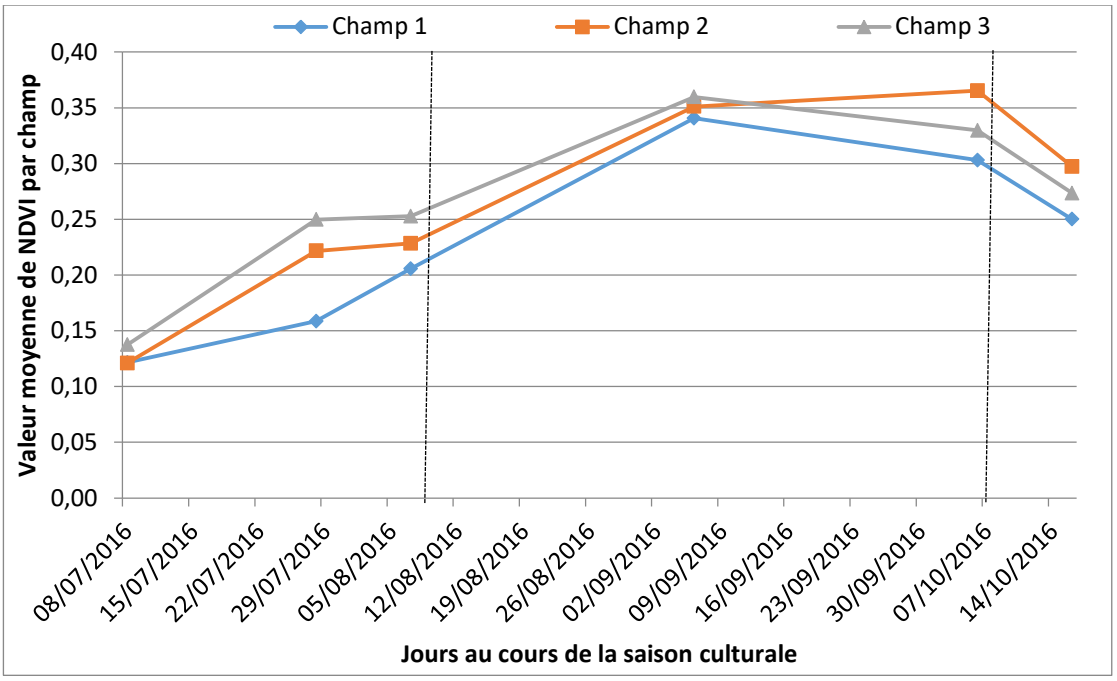


Figure 72: Variation temporelle du NDVI sur le site de Banizoumbou durant la saison culturale 2016

6.3.3. Capacité de rétention en eau et réserve utile

La figure 73 présente les teneurs en eau à la capacité au champ et au point de flétrissement permanent mesurées sur les différentes EHS durant les saisons culturales de 2015 et 2016. Ces résultats montrent que les teneurs en eau sont variables d'une EHS à une autre à l'intérieur des champs agricoles. L'analyse de variance montre qu'il existe une différence significative entre les teneurs en eau à chaque valeur de potentiel matriciel ($p < 0,05$). Les surfaces DEC ont la plus grande capacité de rétention en eau du sol, quel que soit le potentiel appliqué. Elle est de 13-17 % pour la capacité au champ et de 2-3 % pour le point de flétrissement permanent sur cette entité de surface. Ensuite viennent dans l'ordre décroissant les EHS de type ERO et ST-FA. Les surfaces ST-SN et EOL-GS ont une capacité de

rétention relativement similaire, variant entre 4 et 4,3% pour la capacité au champ et 0,8 et 0,9 au point de flétrissement permanent.

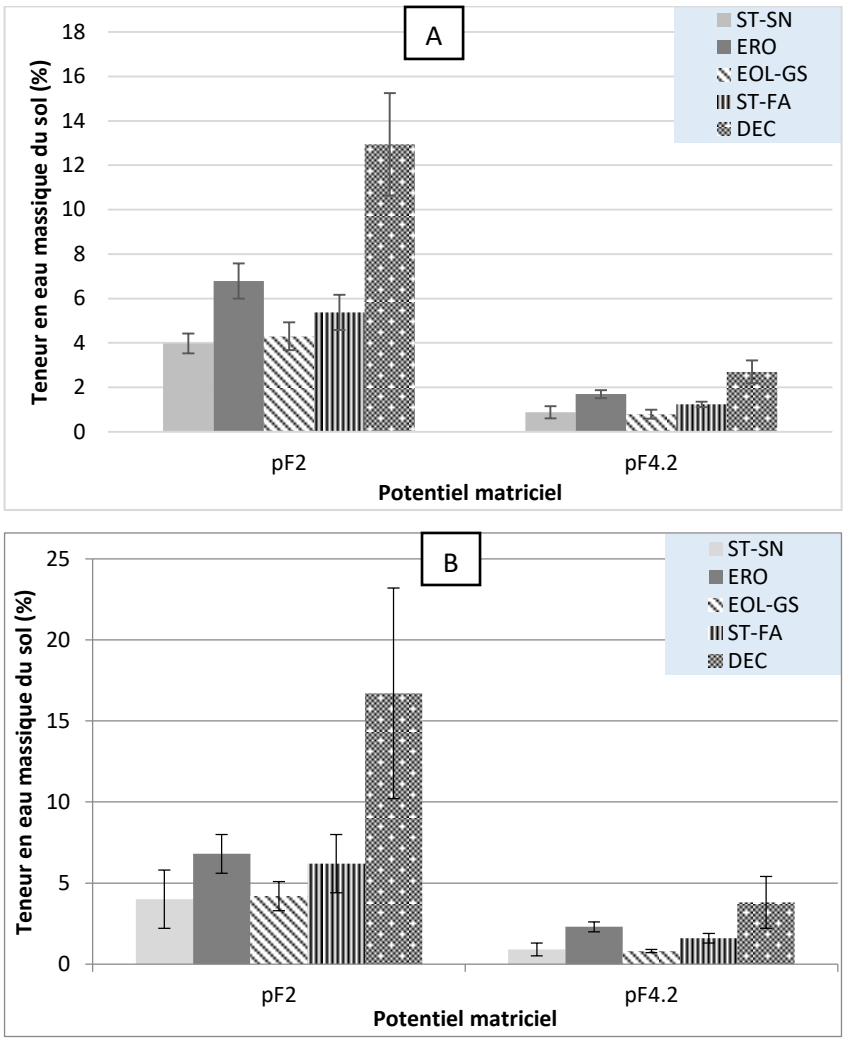


Figure 73: Teneurs en eau à la capacité au champ (pF2) et au point de flétrissement permanent (pF4.2) mesurées sur les EHS du site de Banizoumbou. a. Durant la saison culturale 2015. b : Durant la saison culturale 2016.

La figure 74 regroupe les valeurs de la réserve en eau utile calculées pour les différentes EHS pour deux saisons culturales pour une épaisseur de sol de 5 cm. La réserve en eau utile la plus élevée est obtenue pour l'EHS DEC (11 mm). Les valeurs les plus faibles sont obtenues pour les EHS EOL-GS (2,4 mm) et ST-SN (2,4 mm). Les valeurs mesurées sur les EHS de type ST-FA et ERO sont, respectivement, de 3,3 mm et 4,4 mm.

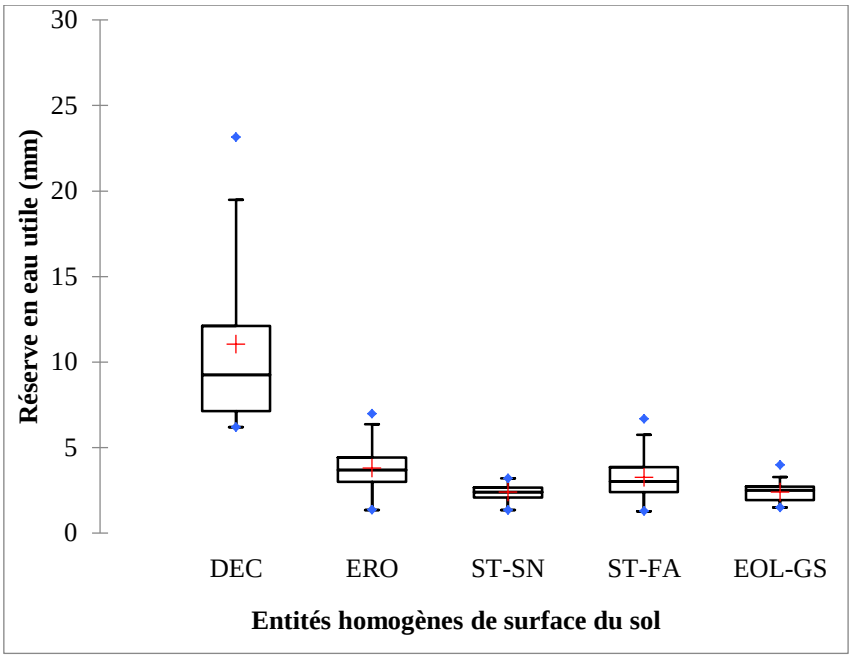


Figure 74: Réserve en eau utile en fonction des entités homogènes de surface du sol 2015 et 2016 confondus

6.3.4. Caractérisation et suivi temporelle du NDWI

Les figures 75, 76 et 77 illustrent la distribution et la variabilité spatio-temporelle de l'état hydrique des sols au cours de la saison culturale 2016 sur le site de Banizoumbou. L'analyse de ces figures indique une variabilité spatio-temporelle de l'état hydrique à l'intérieur ou entre les champs agricoles au cours de la saison culturale.

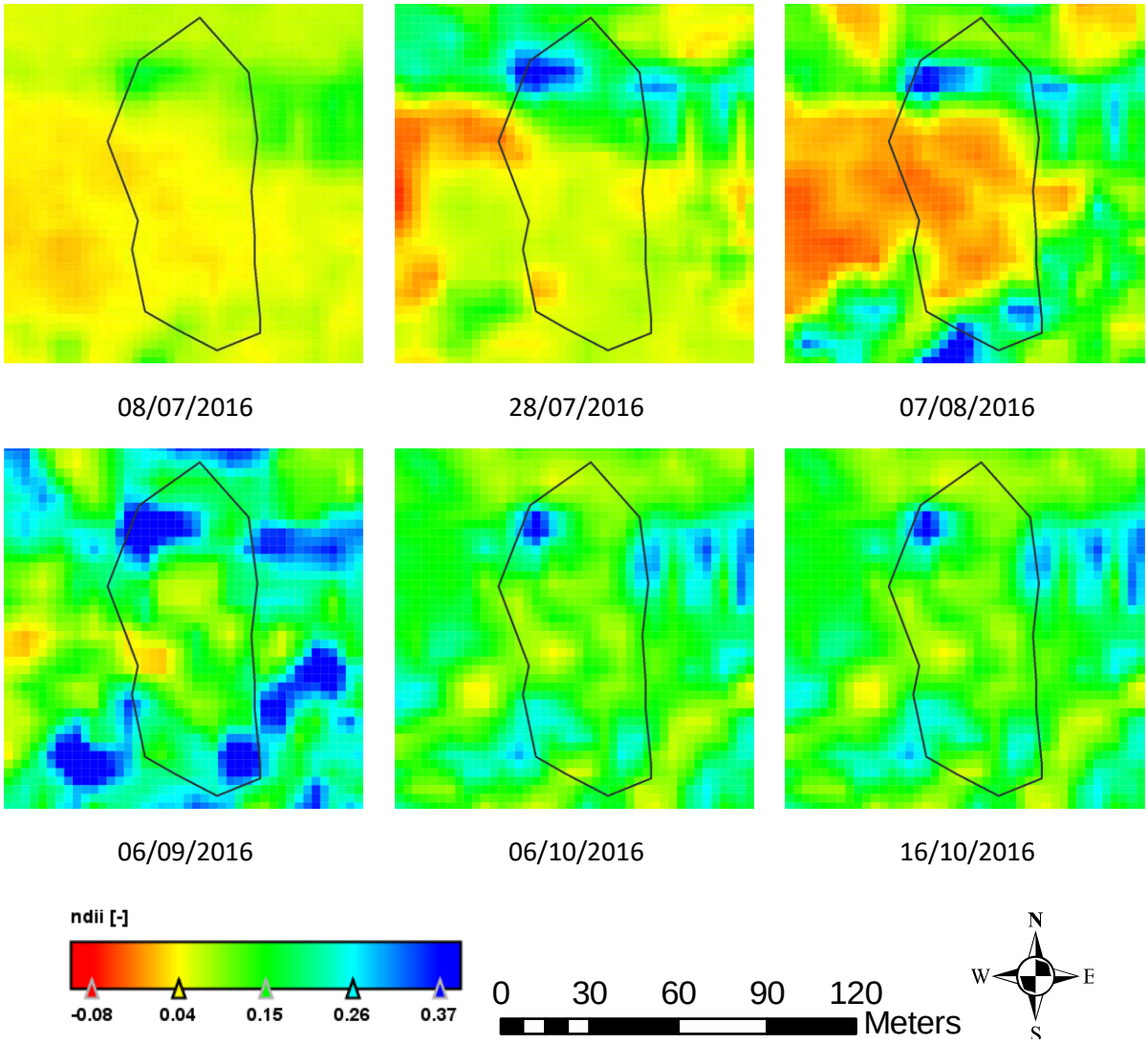


Figure 75: Caractérisation et suivi temporel du NDWI sur le champ 1 durant la saison culturale 2016

Le cadre noir reprsente la limite du champ. Les valeurs proches de -0,08 correspondent au stress hydrique et celles proche de 0,2 ou plus correspondent à une couverture végétale non stresséé.

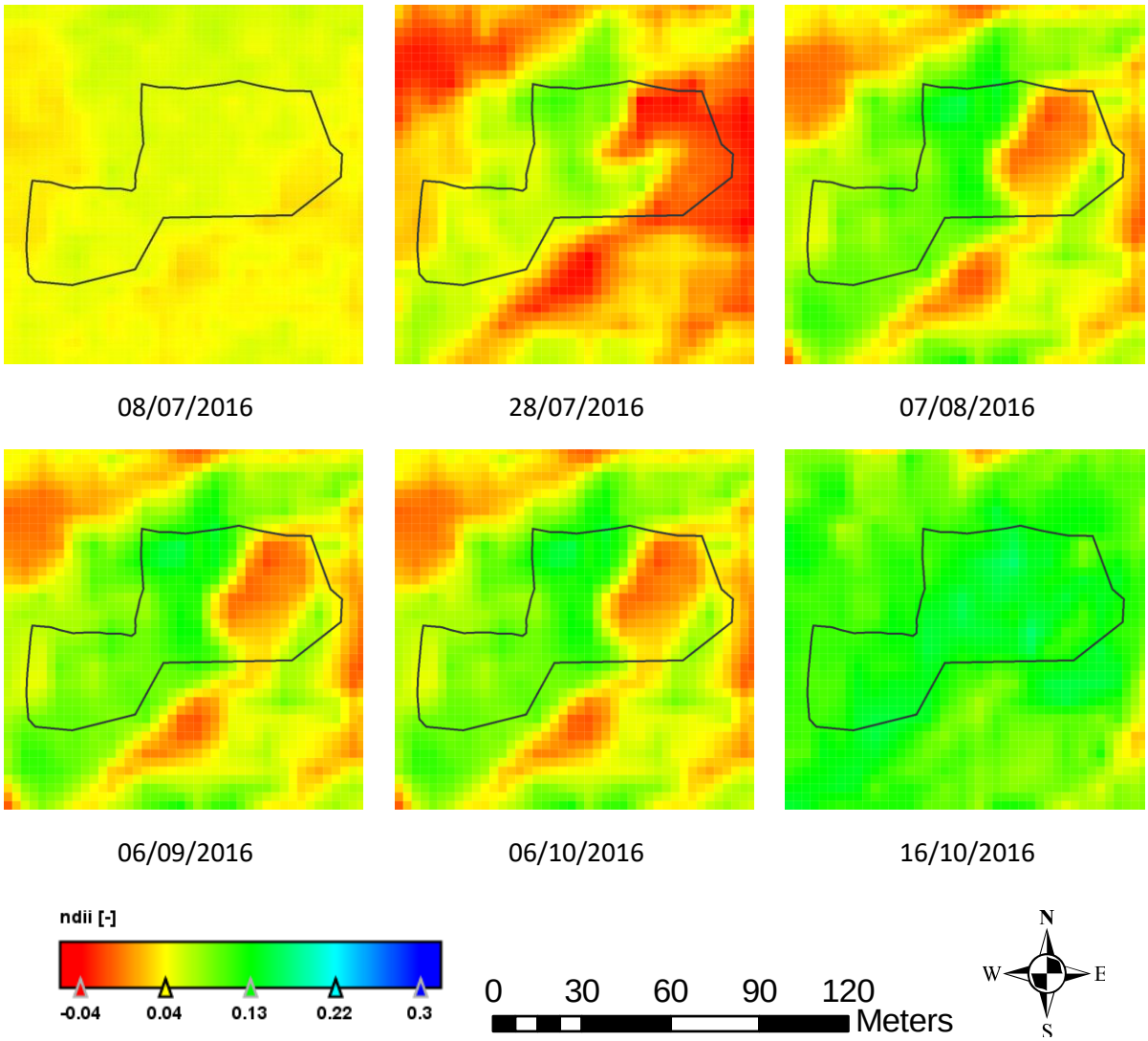


Figure 76: Dynamique temporelle du NDWI sur le champ 2 au cours de la saison culturale 2016

Le cadre noir reprsente la limite du champ. Les valeurs proches de -0,08 correspondent au stress hydrique et celles proche de 0,2 ou plus correspondent à une couverture végétale non stresséé.

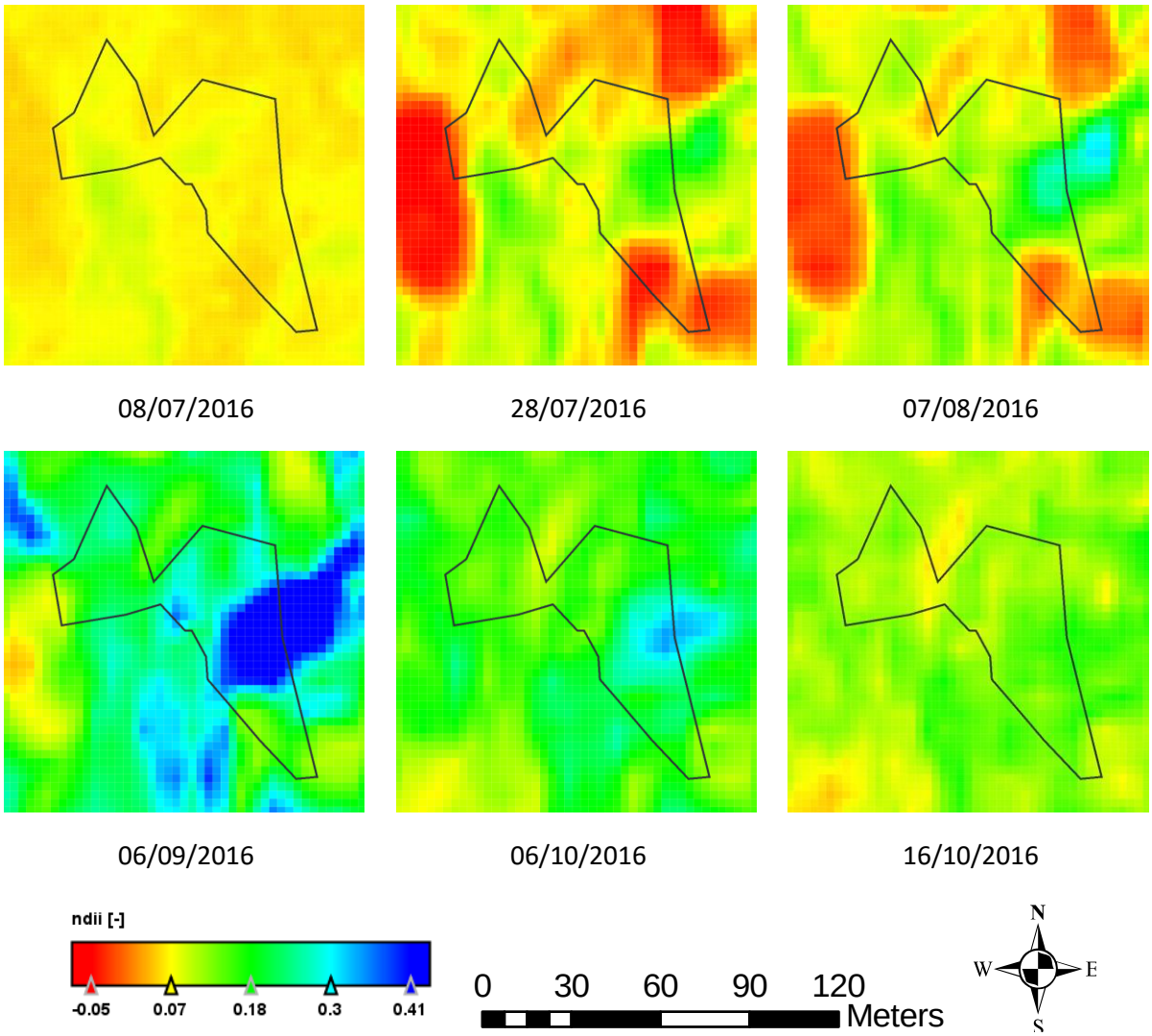


Figure 77: Dynamique temporelle du NDWI sur le champ 3 au cours de la saison culturale 2016

Le cadre noir reprsente la limite du champ. Les valeurs proches de -0,08 correspondent au stress hydrique et celles proche de 0,2 ou plus correspondent à une couverture végétale non stresséé.

La figure 78 illustre l'évolution des valeurs de NDWI dans les champs agricoles au cours de la saison culturale. L'état hydrique des cultures varie de façon similaire sur l'ensemble des champs. Les valeurs de NDWI varient de 0,05 à 0,17 dans le champ 1, de 0,05 à 0,25 dans le champ 2 et de 0,07 à 0,27 dans le champ 3 sur le site de Banizoumbou. L'analyse de cette figure révèle trois périodes différentes :

- Une période sèche marquée par le stress hydrique au début de la saison des pluies, c'est-à-dire en Juillet. Elle coïncide avec la période où l'activité photosynthèse est la plus basse d'après les valeurs du NDVI (cf. fig 65);

- Une période relativement humide entre Août et Septembre avec des valeurs du NDVI relativement élevées. Elle coïncide avec la période où l'activité photosynthèse est la plus forte d'après les valeurs du NDVI (cf. fig 65)
- Une période de décroissance de l'humidité à partir du mois d'Octobre. Cette période correspond à la baisse des valeurs du NDVI (cf. fig 65) en lien avec la fin du cycle végétatif des cultures, la phase de senescence des végétaux ou les activités de récolte.

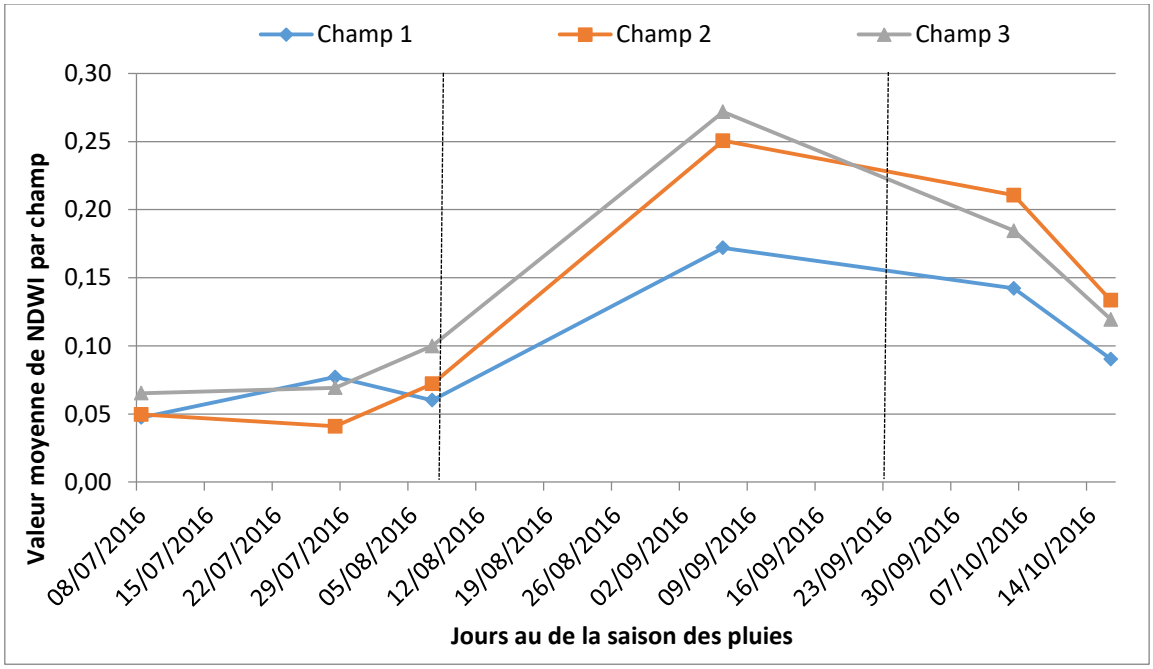


Figure 78: Variation temporelle du NDWI sur le site de Banizoumbou

6.3.5. Conductivité hydraulique à saturation (Ks)

La figure 79 montre la variation du Ks mesurée au début des saisons culturales 2015 et 2016 sur les différentes EHS. Les entités homogènes de surface de type EOL-GS montrent les valeurs Ks les plus élevées (64,4 mm h^{-1}), viennent ensuite les entités ST-FA avec des valeurs de Ks de l'ordre de 39 mm h^{-1}. Les valeurs les plus faibles (5,3 mm h^{-1} et 2,7 mm h^{-1}) sont mesurées, respectivement sur les entités de type ERO et DEC. Les valeurs mesurées sur les entités de type ST-SN sont de l'ordre de 26,8 mm h^{-1}.

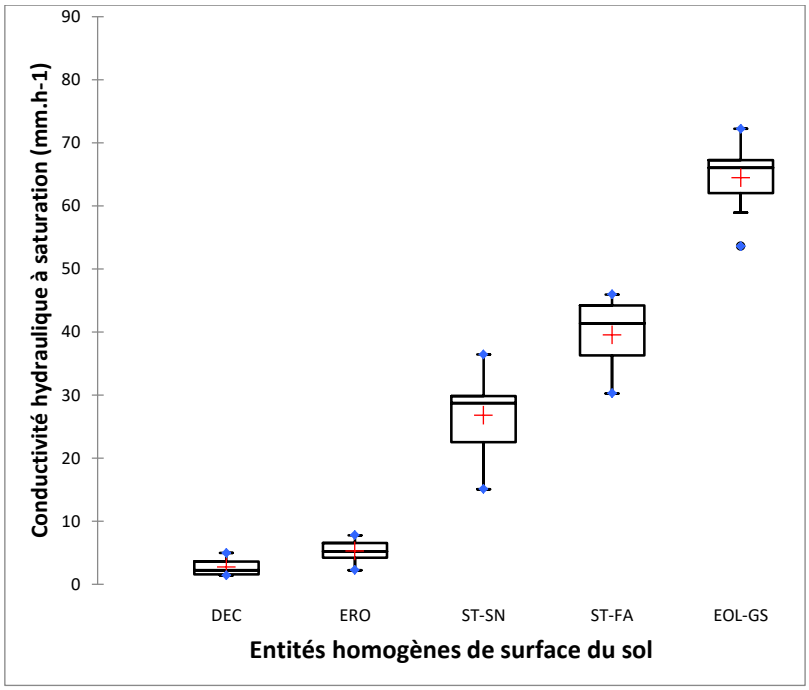


Figure 79: Conductivité hydraulique à saturation (Ks) en fonction des entités homogènes de surface du sol en

6.3.6. Evolution temporelle de la conductivité hydraulique à saturation en fonction des entités homogènes de surface du sol après le sarclage

La figure 80 illustre l'évolution temporelle du Ks entre les EHS en fonction du cumul des pluies au cours des saisons culturales 2015 et 2016. Les mesures de Ks réalisées en fonction de ces cumuls des pluies ont été effectuées aux mêmes dates que les relevés des EDS après le sarclage. De manière générale, le Ks diminue considérablement sur toutes les EHS avec le cumul des pluies. Les valeurs de Ks les plus élevées sont mesurées sur les EHS de type EOL-GS après le sarclage. Ces valeurs varient de 101-106 mm h^{-1} (après 10 mm de cumul de pluies) à 24-27 mm h^{-1} (après 200 à 300 mm de cumul de pluie). Les entités de type ST-FA montrent des valeurs de Ks qui décroissement et qui tendent vers celles de ST-SN. En 2016, le Ks devient sensiblement similaires entre ST-SN et FA après 200 mm de pluie. Sur les surfaces de type DEC et ERO, le Ks devient rapidement très faible même après 10 mm de pluie. Les croûtes sont reconstituées et réduisent la susceptibilité à l'infiltration de ces entités. Les valeurs de Ks mesurées sur les EHS de type DEC et ERO deviennent alors stationnaire (1 mm.h^{-1}) à partir de 90 mm de pluie. Quelle que soit l'entité considérée, les effets du travail de sol s'estompent au-delà de 200 mm.

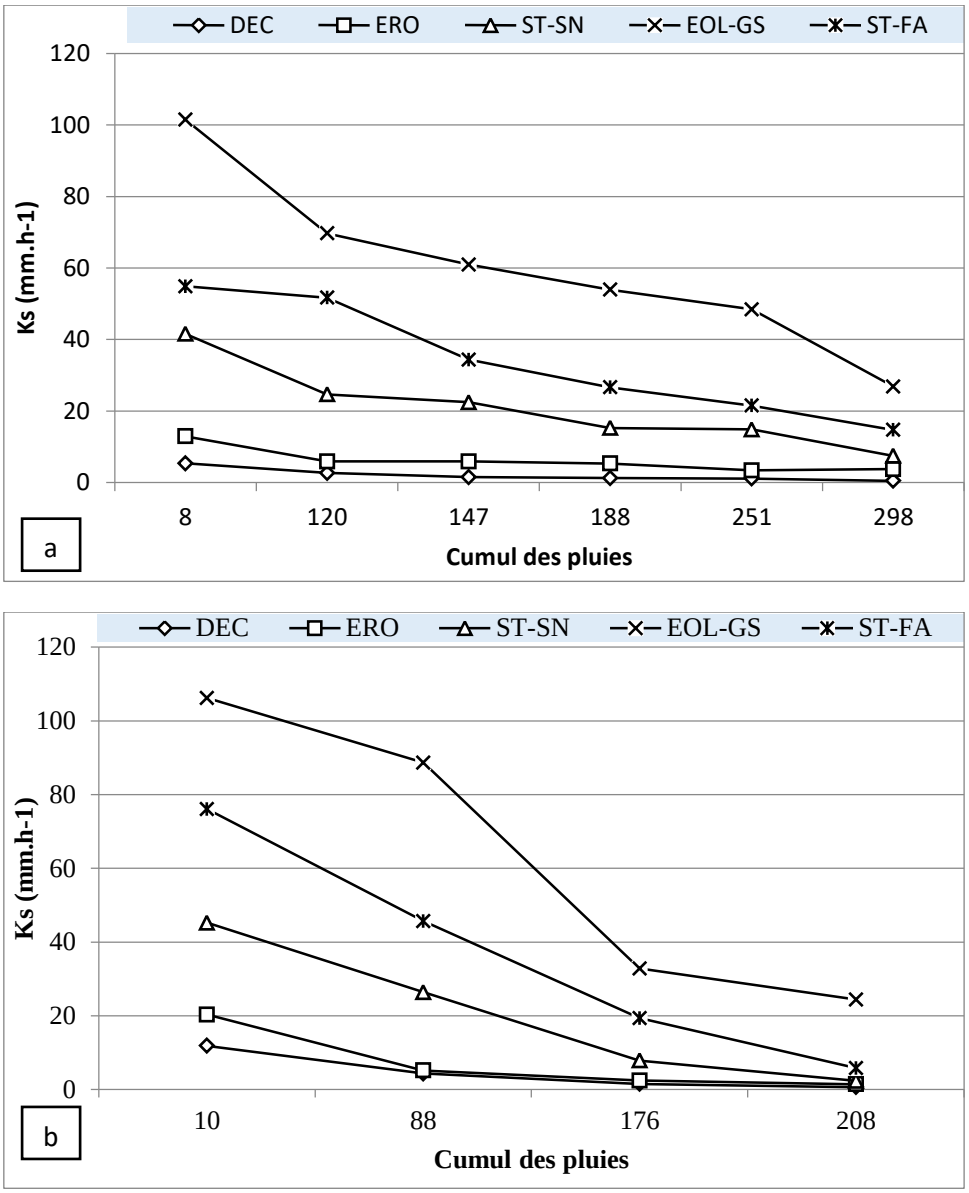


Figure 80: Evolution temporelle de la conductivité hydraulique après sarclage en fonction des EHS. a : 2015 et b : 2016

6.3.7. Corrélation entre les paramètres hydrauliques des sols et les caracteristiques des EHS

La figure 81 présente une analyse en composante principale entre les EHS et les paramètres de densité apparente, capacité de rétention en eau à la capacité au champ et au point de flétrissement permanent, la teneur en carbone, réserve en eau utile, conductivité hydraulique à saturation, recouvrement végétal, proportion des croûtes d'érosion, structurale, microbiotiques, de ruissellement, de décantation et de la litière.

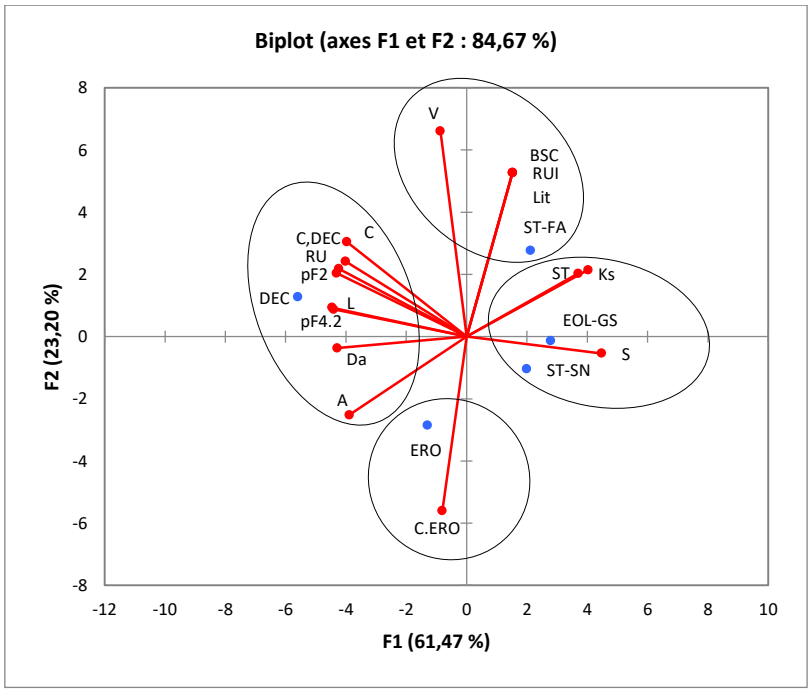


Figure 81: analyse en composante principale des EHS et des paramètres du sol : densité apparente (Da), capacité de rétention en eau à la capacité au champ (wpF2) et au point de flétrissement permanent (wpF4.2), carbone (C), réserve en eau utile (RU), conductivité hydraulique à saturation (Ks), recouvrement végétal (V), proportion des croûtes d'érosion (C.ERO), structurale (ST), microbiotiques (BSC), de ruissellement (RUI), de décantation (C.DEC) et de la litière (Lit)

L'analyse de cette figure montre que les deux premiers axes expriment 84,67 % de la variance de totale. L'analyse couplée à celle du tableau 34 permet de distinguer quatre groupes d'EHS en fonction des paramètres impliqués :

- l'EHS DEC corrélée avec la teneur en carbone, la densité apparente, la capacité de rétention en eau à la capacité au champ et au point de flétrissement permanent, la réserve en eau utile, les particules d'argiles et de limon ;
- l'EHS ST-FA corrélée avec le recouvrement végétal, les croûtes microbiotiques, les croûtes de ruissellement et les litières ;
- les EHS EOL-GS et ST-SN qui sont corrélées aux paramètres de conductivité hydraulique, de croûte structurale et les teneurs en sables ;
- l'EHS ERO caractérisée principalement par la croûte d'érosion.

Tableau 33 : Valeurs des contributions et des cosinus² entre les EHS et les paramètres du sol : de densité apparente, capacité de rétention en eau à la capacité au champ et au point de flétrissement permanent, carbone, réserve en utile, conductivité hydraulique à saturation, recouvrement végétal, proportion des croûte d'érosion, structurale, microbiotiques, de ruissellement, de décantation et de la litière

	F1		F2	
	Contribution	Cosinus²	Contribution	Cosinus²
DEC	63,635	**0,928**	8,722	0,048
ERO	3,426	0,131	44,009	**0,636**
ST-SN	8,031	**0,595**	5,875	0,164
EOL-GS	15,770	**0,676**	0,103	0,002
ST-FA	9,138	0,293	41,291	**0,500**
Ks	6,847	**0,673**	2,065	0,077
C	7,913	**0,778**	4,659	0,173
RU	9,005	**0,886**	2,390	0,089
A	7,578	**0,745**	3,184	0,118
L	9,979	**0,981**	0,436	0,016
S	10,036	**0,987**	0,146	0,005
Da	9,207	**0,906**	0,068	0,003
pF2	9,303	**0,915**	2,089	0,078
pF4.2	9,727	**0,957**	0,384	0,014
V	0,380	0,037	21,887	**0,813**
ST	8,127	**0,799**	2,296	0,085
C.ERO	0,327	0,032	15,748	**0,585**
DEC	8,088	**0,795**	2,937	0,109
RUI	1,161	0,114	13,904	**0,516**
BSC	1,161	0,114	13,904	**0,516**
Lit	1,161	0,114	13,904	**0,516**

6.4. Discussion partielle

Les résultats de ce travail ont montré que l'hétérogénéité de surface du sol influence significativement le fonctionnement hydrique des sols. Les propriétés hydrodynamiques varient d'une entité à une autre. Ces travaux sont en accord avec ceux de Niang et al (2004) qui ont montré dans le Sahel burkinabé une différenciation du fonctionnement hydrique en fonction des états de surface du sol. Les mesures de conductivité hydraulique à saturation (Ks) révèlent que le Ks est plus important sur les EHS de type EOL-GS et plus faible sur DEC et ERO. Les valeurs trouvées sur les entités EOL-GS sont en accord avec la structure du sol caractérisée par un dépôt éolien sous forme de butte sableuse très poreuse autour de *Guiera senegalensis* qui génère une meilleure circulation de l'eau et des bonnes conditions de développement racinaire (Dan Lamso et al., 2015a,b ; Wezel, 2002). En plus, ces surfaces attirent les termites et les fourmis connues pour leur rôle sur l'infiltration de l'eau en lien avec leurs activités de récolte et de décomposition de la matière organique (Ouédraogo, 1997 ; Jouquet et al., 2012 ; 2014)..

Les surfaces DEC enregistrent les plus faibles valeurs de KS. Ceci peut s'expliquer par la présence des particules fines et par la présence des croûtes de décantation. En effet, la couche superficielle de surface sur cette entité est en générale recouverte par une couche argileuse qui limite fortement l'infiltration. La faible infiltration observée sur ERO est est le résultat du niveau de pauvreté en matière organique et du développement de la croûte d'érosion, véritable contrainte au transfert de l'eau dans le sol (Casenave et Valentin, 1989). Sur ces surfaces, le suivi des EDS a montré un taux de recouvrement végétal inexistant, ce qui, en conséquence, réduit leur infiltrabilité. Les valeurs obtenues sur ERO et DEC sont proches obtenues par Niang et al. (2004) mesurées sur des sols similaires (2,7 mm/h). Par ailleurs, la capacité de rétention en eau du sol s'avère plus importante sur ces deux EHS par rapport aux autres. Nos résultats, indiquent, en effet, que les EHS DEC sont fortement corrélées à la teneur en carbone, à la capacité de rétention en eau, à la densité apparente et aux particules de limons et d'argile. Yang et al. (2014), ont montré que les propriétés de rétention en eau du sol sont corrélées avec les particules fines et la densité.

Les résultats ont montré que les entités de surface de type ST-FA ont des valeurs de Ks plus élevées par rapport aux surfaces ST-SN. Cette différence constatée sur ces deux surfaces peut-être en rapport avec la matière organique et au développement de la végétation. En effet, ST-FA, associée à l'espèce *Faidherbia albia*, est le siège d'accumulation d'excréments d'animaux et de son feuillage qui limitent l'impact des gouttes des pluies, la formation des croûtes et favorisent l'infiltration et la rétention en eau du sol. Par ailleurs, la richesse de ces EHS en matière organique favorise l'activité des termites qui détruisent les croûtes et améliorent la porosité des sols (Brouwer et al., 1992 ; Mando et al., 1996). En revanche, les EHS ST-SN sont des surfaces régulièrement soumises à l'érosion hydrique et éolienne qui réduisent l'infiltrabilité des sols.

Les résultats présentés ici, a permis de comprendre l'évolution des états de surface en fonction des stades phénologiques de la culture du niébé au cours des saisons culturales. Les encroûtements superficiels se reconstituent au cours de la saison et contribue à la baisse de l'infiltrabilité des sols qui se trouve fortement réduite (Casenave et Valentin, 1992 ; Bielders et al., 1996). En effet en zone sahélienne, les meilleurs conditions de circulation de l'eau sont sous le contrôle des encroutements superficiels (Casenave et Valentin, 1989). Nos travaux ont montré par ailleurs une décroissance de la conductivité hydraulique à saturation sur l'ensemble des entités homogènes de surface du sol. Cette décroissance est observée, après quelques pluies et suivant le travail du sol pourtant censé assurrer les meilleures conditions de circulation de l'eau dans le sol. Nos travaux rejoignent ceux de Ndiaye *et al.,* (2005), Malam Abdou et al (2015, 2016) qui ont montré sur des sols au Niger et au Sénégal, la décroissance du Ks à mesure que le cumul de pluie augmente. Ces auteurs expliquent qu'après un cumul de pluie de 70 mm, le travail du sol n'a aucun effet sur l'infiltration. La décroissance du Ks est surtout en rapport avec l'encroûtement du sol causé par l'agressivité des pluies.

Le suivi des états de surface a montré la variabilité fonctionnelle du couvert végétal, en l'occurrence le niébé dans les champs agricoles. Le caractère hétérogène de la couverture végétale et la variabilité du développement des cultures dans les champs a aussi été démontré par les analyses spatiales des valeurs du NDVI. Le recouvrement en niébé connait une augmentation significative mais hétérogène d'une entité à une autre depuis la levée

jusqu'à la récolte sur l'ensemble des entités homogènes de surface du sol excepté l'EHS ERO où on assiste à la disparition totale du niébé. Le développement du couvert est plus important sur les EHS de type ST-FA par rapport aux autres EHS. Cette hétérogénéité du couvert végétal a été confirmée par les mesures de NDVI qui ont montré la variabilité de la croissance végétale à l'intérieur et entre les champs.

Le suivi de l'état hydrique des cultures par les images Sentinel-2 a montré la variabilité temporelle du stress hydrique et de l'activité de photosynthèse des cultures à l'intérieur des champs agricoles. Les périodes les plus sèches concernent en général le début de l'installation des pluies et leur fin. Les cultures sont moins denses à ces périodes. Les travaux ont montré que les périodes relativement humides correspondent avec elles des valeurs de NDVI. Ces périodes correspondent toutefois à celles des fortes précipitations sur le site de Banizoumbou. Les travaux de Hountondji et al. (2004 ; 2004) en zone sahélienne du Niger ont montré la corrélation entre les précipitations et le NDVI.

6.5. Conclusion partielle

Cette étude a permis de comprendre l'évolution des états de surface en fonction des stades phénologiques de la culture du niébé au cours des saisons culturales. Les résultats ont montré que les organisations de surface se reconstituent au cours de la saison et même après le sarclage. Certaines entités de surface du sol comme ST-SN et ST-FA sont vulnérables à la formation des croûtes d'érosion à partir du stade de la floraison. Le recouvrement végétal en niébé connait une augmentation significative mais hétérogène d'une entité à une autre depuis la levée jusqu'à la récolte sur l'ensemble des entités homogènes de surface du sol. Sur la surface ERO, la croissance du niébé s'arrête après la levée. Les suivis temporels du NDVI et du NDWI ont montré la variabilité de la croissance végétale et de l'état hydrique des cultures à l'intérieur des champs agricoles.

Les résultats de cette étude ont permis de montrer que les propriétés hydriques sont variables dans les champs agricoles. Les EHS DEC et ERO sont les surfaces ayant la plus forte capacité de rétention en eau. Par contre, ces entités enregistrent les faibles valeurs de

conductivité hydraulique. La conductivité est plus importante par ordre croissant sur ST-SN, ST-FA et EOL-GS. Les mesures de conductivité réalisées après le sarclage ont montré qu'elle diminue progressivement à mesure que le cumul de pluie augmente à cause du développement des croûtes. Cette décroissance de la conductivité est observée sur l'ensemble des EHS.

Ces résultats soulignent l'importance de la prise en compte de l'hétérogénéité des propriétés hydriques des sols pour la compréhension de la variabilité de production du niébé à l'échelle des champs agricoles.

Chapitre 7 : Effet de l'hétérogénéité de surface du sol sur la nodulation et la production du niébé

7.1. Introduction

Ce chapitre traite de l'influence de l'hétérogénéité de surface du sol la production du niébé. Il sera question d'évaluer la formation des nodules totaux et fonctionnels et les rendements en fanes et en grains des variétés de niébés sur les entités homogènes de surface du sol sur les différents sites d'étude. Ceci permettra de hiérarchiser et de distinguer les entités de surface les plus productives et les moins productives.

7.2. Matériel et méthodes

7.2.1. Choix des champs d'étude et dispositif des essais

Les dispositifs expérimentaux sont repartis sur les trois champs agricoles étudiés sur chaque site. Le choix des champs se base sur la représentativité des EHS sur chaque site. Sur chaque site et pour chaque EHS, six paires de parcelles ont été délimitées à l'aide des piquets avec la collaboration des propriétaires des champs. Au total, 240 parcelles soit 30 paires de parcelles par site ont été délimitées en 2015 et 2016 (tableau 34). Sur chaque site, les parcelles sont reparties en 6 paires, chacune ayant été semée avec une variété améliorée (KVX 61-1) et une variété locale (celle cultivée par les paysans sur chaque site). La figure 82 illustre l'exemple du dispositif expérimental sur les sites de Banizoumbou et de Sadoré.

Tableau 34: Dénombrement et surface des parcelles expérimentales dans les quatre sites d'étude

Entités homogènes de surface du sol	Région de Tillabéri				Région de Maradi			
	Banizoumbou		Sadoré		Arraourayé		Tarna	
	N	S (m²)	N	S (m²)	N	S (m²)	N	S (m²)
ERO	12	31	12	37	-	-	-	
ST-FA	12	103	12	93	12	55	12	108
DEC	12	29	12	39	12	49	-	-
EOL-GS	12	20	12	20	12	29	-	-
ST-SN	12	33	12	45	12	45	12	30
ST-F	-	-	-	-	12	13	12	13
DEC-AL	-	-	-	-	-	-	12	30
DEC-AL-FA	-	-	-	-	-	-	12	127
Total	60	-	60	-	60	-	60	

N = nombre de parcelle, S = superficie moyenne

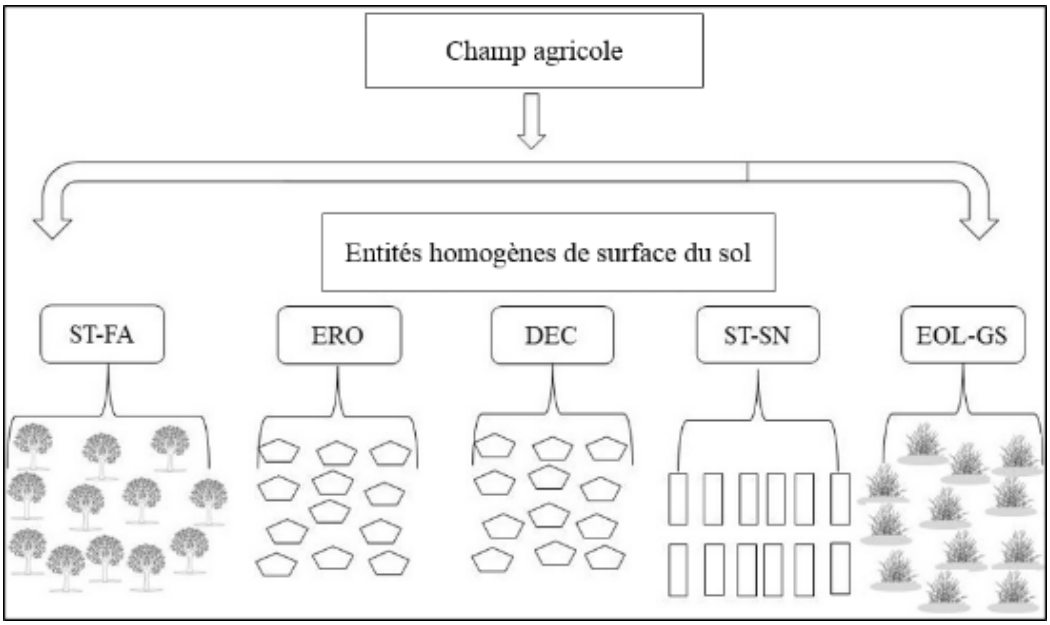


Figure 82: schéma du dispositif sur les sites de Banizoumbou et Sadoré

Les parcelles des différentes EHS ont des tailles et des formes variables :

- les parcelles des ST-FA varie entre 93 à 103 m² ;
- les parcelles des EHS de type ERO varient entre 31 et 37 m² ;
- les parcelles des EHS de type DEC varient entre 29 et 49 m² ;
- les parcelles des EHS de type EOL-GS varient entre 20 et 29 m²
- les parcelles des EHS de type ST-SN varient entre 33 et 45 m² ;
- les parcelles des EHS de type ST-F mesurent en moyenne 13 m² ;

- les parcelles des EHS de type DEC-AL mesurent en moyenne 30 m² ;
- les parcelles des EHS de type de DEC-AL-FA mesurent en moyenne 127 m².

7.2.2. Variétés de niébé utilisées

La réponse des variétés de niébé selon l'hétérogénéité de surface du sol a été étudiée en utilisant une variété améliorée (KVX61-1) et une variété locale spécifique à chacun des 4 sites. Le choix de cette variété a été guidé par l'usage des producteurs (tableau 35).

- La variété KVX 61-1 est une variété améliorée à port érigé, résistante au stress hydrique et possédant un cycle végétatif court (de 65 à 75 jours). Son intérêt pour notre travail réside dans la possibilité de pouvoir comparer sa performance et celle des variétés paysannes vis-à-vis de l'hétérogénéité de surface du sol (figure 83a)
- La variété locale du site de Banizoumbou (région de Tillabéri) est appelé « Dounguri koirey » en langue zarma, ce qui veut dire « niébé blanc » en français. C'est une variété à double usage (performante pour la production en fanes et en grains), semi-rampante à cycle long (90 jours) et sensible aux maladies et à la sécheresse. Dans la suite du texte, cette variété sera appelée DK (figure 83b);
- la variété locale de niébé utilisé sur le site de Sadoré (région de Tillabéri) est appelée « local Sadoré ». C'est une variété rampante et à cycle long (90 jours). Elle est également performante à la fois pour la production en fanes et celle de grains. Cette variété sera désignée par LS dans la suite de ce manuscrit (figure 83c);
- la variété locale du site de Arraourayé (région de Maradi), est appelée en langue Haoussa « Dan Zahi », appelé ainsi à cause de sa précocité (cycle de 75 à 80 jours). Elle est semi-rampante, à double usage et très sensible au striga, pucerons, thrips, punaise, et foreuses de gousses (figure 83d).
- la variété locale du site de Tarna (région de Maradi), est appelé « Barta tahi» ou « Barta » en langue Haoussa, ce qui veut dire en français « laisse la partir». La variété locale Bartha tahi est une variété rampante, à cycle long de 80 à 120 jours. Elle a une bonne production en grains et fanes. Cette variété est inscrite dans le Catalogue National des Espèces et Variétés Végétales (CNEV) du Niger de 2012 sous le nom de TN 27-80 avec un rendement moyen à l'hectare de 1,5 tonne. Cette variété est sensible au *striga*, puceron, thrips, punaise, virose, pourriture grise, foreuse des gousses et est adaptée à la culture associée (figure 83e).

a) Variété améliorée KVX 61-1

b) Variété locale du site de Banizoumbou (DK)

c) Variété local du site de Sadoré (LS)

d) Variété locale du site de Arraourayé (Dan Zahi)

e) Variété locale du site de Tarna (Bartha)

Figure 83: Variétés de niébé suivies sur les 4 sites étudiés

Tableau 35: Caractéristiques des variétés améliorées et locales de niébé utilisées

Sites	Dénominations	Durée du cycle	Port végétatif	Usages	Résistance au stress hydrique	Résistance aux parasites
Tous les sites	KVX 61-1	65 à 75	Erigé	mono	bonne	Faible
Banizoumbou	Dounguri koirey (DK)	90	Semi-rampante	double	Faible	Faible
Sadoré	local Sadoré (LS)	90	Semi-rampante	double	Faible	Faible
Arraourayé	Dan Zahi	75 à 80	Semi-rampante	double	Faible	Faible
Tarna	Bartha	80-100	Rampante	double	Faible	Faible

7.2.3. Suivi de la culture de niébé

Sur chaque site, le suivi de la culture du niébé a été opéré selon le calendrier cultural indiqué dans le tableau 36. Toutes les variétés ont été cultivées en association avec le mil en respectant les pratiques culturales selon les savoirs locaux, notamment le semis et les travaux d'entretien.

Les paramètres de suivi regroupent: (i) le nombre de nodosités totales et fonctionnelles des différentes variétés de niébé et (ii) les rendements en fanes et en grains des variétés.

Les nodosités fonctionnelles sont celles qui sont aptes à la transformation de l'azote fixé en ammonium par les bactéroïdes. Elles sont identifiables à travers la coloration rosâtre et rougeâtre du liquide en leur sein. Les nodosités totales regroupent les nodosités fonctionnelles et celles qui sont non fonctionnelles (mortes). Sur chaque parcelle, 3 à 4 pieds de niébé représentatifs de la parcelle ont été utilisés pour le dénombrement des nodosités au stade de la floraison, phase végétative durant laquelle la croissance des nodosités est optimale. La mesure des nodosités a été faite selon la méthode de Aboubacar *et al.* (2013).

La moyenne des nodosités des 3 à 4 pieds de niébé représente le nombre de formé par plant pour chaque variété de niébé.

$$Nod = \frac{Nodp}{p}$$

Avec Nod qui exprime le nombre de nodosités totale ou fonctionnelle par plant de niébé, Nodp le nombre de nodosités par plant et p nombre de plants déterrés.

Les gousses sont récoltées à maturité. Elles sont séchées au soleil puis pesées. Elles sont ensuite décortiquées pour déterminer les rendements en grains rapportés à la surface de chaque parcelle. Les parties aériennes de la plante de niébé (feuilles et tiges) sont enlevées, mises à sécher au soleil puis pesées. Le rendement en fanes est la somme des poids des coques (résidu des gousses après decorticage) et des parties aériennes, rapportée à la surface de la parcelle. Le tableau 37 présente le calendrier cultural en fonction des sites.Le semi a été tardif sur le site de Banizoumbou en 2016. La récolte du niébé est échelonnée, débute en Septembre et prend fin en octobre sur l'ensemble des sites.

Tableau 36: Calendrier culturale en fonction des sites

	Banizoumbou		Sadoré		Arraourayé		Tarna	
	Semi	Récolte	Semi	Récolte	Semi	Récolte	Semi	Récolte
2015	23/07	12/10	27/07	12/10	12/07	02/10	27/07	15/10
2016	03/08	8/10	06/07	2/10	20/07	5/10	4/07	6/10

7.3. Résultats

7.3.1. Observation générale sur les attaques du niébé sur l'ensemble des sites.

Au cours des deux saisons culturales, les attaques du niébé par les ennemies de cultures sont consignées dans le tableau 37. C'est les attaques de la chenille, du *Striga* et des Acridiens qui les plus remarquables sur les sites. La pression parasitaire la plus faible a été observée sur le site de Sadoré. Les attaques ont engendré beaucoup de perte notamment sur les sites de Banizoumbou, Arraourayé et Sadoré.

Tableau 37: Attaque sur le niébé au courant des saisons culturales 2015 et 2016

	Sadoré		Banizoumbou		Arraourayé		Tarna	
	2015	2016	2015	2016	2015	2016	2015	2016
Acridiens	xx	-	xx	xx	xx	xx	-	-
chenille	xx	xx	xx	xx	xx	xx	xx	xx
Striga	xx	-	xx	xx	xx	xx	xx	xx
Thrips	xx	-	xx	xx	-	-	xx	xx
Lesard	-	-	-	-	-	-	xx	xx
Rongeurs	-	-	xx	xx	-	-	-	-
Puceron (Aphis craccivora)	-	-	xx	xx	xx	xx	xx	xx
Mylabris senegalensis	x	-	xx	xx	x	x	xx	xx
Mirperus jaculus	-	-	x	xx	xx	xx	-	-
Anaplocnemis curvlpes	-	-	xx	xx	xx	xx	xx	xx

- : Absence d'attaque, x : Attaque faible, xx: Attaque importante

La figure 84 montre les attaques par quelques ennemies de la culture du niébé.

(a) Attaque par le criquet

(b) Attaque par les rongeurs

(c) Attaque par la chenille poilue

(d) Infestation par le *Striga*

(a) Attaque par *Anaplocnemis curvipes hétéroptère)*

(b) Attaque par les pucerons

Figure 84: Attaque du niébé par les ennemies de culture

7.3.2. Nodulation et production du niébé sur le site de Banizoumbou

7.3.2.1. Formation des nodules

Le nombre de nodules totaux et fonctionnels des variétés DK et KVX 61-1 sont consignés dans le tableau 38. Le test de comparaisons multiples montre que le nombre des nodules totaux et fonctionnels formés par les deux variétés de niébé durant les années culturales 2015 et 2016 sont toujours significativement plus élevés ($p < 0,05$) sur l'entité ST-FA comparées à toutes les autres EHS. Le nombre de nodule total mesuré sur ST-FA en 2015 et 2016 est respectivement de 40 et 80 nodules/plant pour la variété DK et 47 et 96 nodules/plant pour la variété KVX 61-1. Le nombre de nodules fonctionnels associés est respectivement, pour les années culturales 2015 et 2016, de 44 et 45 nodules/plant pour la variété DK et 29 et 71 nodules/plant pour la KVX 61-1. La nodulation est très faible, voire nulle, sur l'EHS de type ERO. Le nombre de nodules sur les EHS de type EOL-GS, DEC et ST-SN sont de même ordre de grandeur entre (14 et 29 nodules/plant pour la variété DK, 10 et 20 nodules/plant pour la variété KVX 61-1) en 2015. En 2016, le nombre de nodules formés ne présentent pas de différence significative entre EHS DEC et EOL-GS et varie entre 25 et 31 nodules/plant pour la variété DK et 30 et 37 nodules/plant pour la variété KVX 61-1. Les nodules formés sur ces deux entités sont plus importants que ceux obtenus sur ST-SN (11 nodules/plant pour la variété DK et 15 nodules/plant pour la variété KVX 61-1) lui-même plus important sur ceux obtenus sur ERO (pas de nodule formé).

Les résultats de l'analyse de variance réalisée entre une année culturale et une autre indiquent la variabilité interannuelle de la nodulation du niébé entre les différentes EHS (tableau 39). La formation des nodules totaux et fonctionnels chez les variétés de niébé en fonction de l'hétérogénéité de surface du sol se hiérarchise globalement comme suit : ST-FA> EOL-GS=DEC>ST-SN>ERO. La formation des nodules entre les variétés DK et KVX 61-1 ne présente pas de différence notable.

Tableau 38: Résultats du test de comparaisons multiples des moyennes du nombre de nodules totaux et fonctionnels formés par plant sur les variétés DK et KVX 61-1 en fonction des EHS à Banizoumbou en 2015 et 2016

Nombre de nodules totaux par plant				
	2015		2016	
Entités de surface	**DK**	**KVX 61-1**	**DK**	**KVX 61-1**
ST-SN	14b	10b	11b	15b
ERO	2a	7a	0a	0a
DEC	18b	20b	25c	30c
EOL-GS	29b	20b	31cd	37c
ST-FA	80c	96c	40d	47d
p	0,001	0,001	0,001	0,001

Nombre de nodules fonctionnels par plant)				
ST-SN	9a	7a	0a	0a
ERO	2a	6a	12b	8b
DEC	14a	14a	24c	19bc
EOL-GS	17a	14a	32c	27c
ST-FA	45b	71b	44d	29c
p	0,002	0,002	0,001	0,001

Les chiffres suivis de la même lettre dans la même colonne ne sont pas significativement différents au seuil de p = 0.05

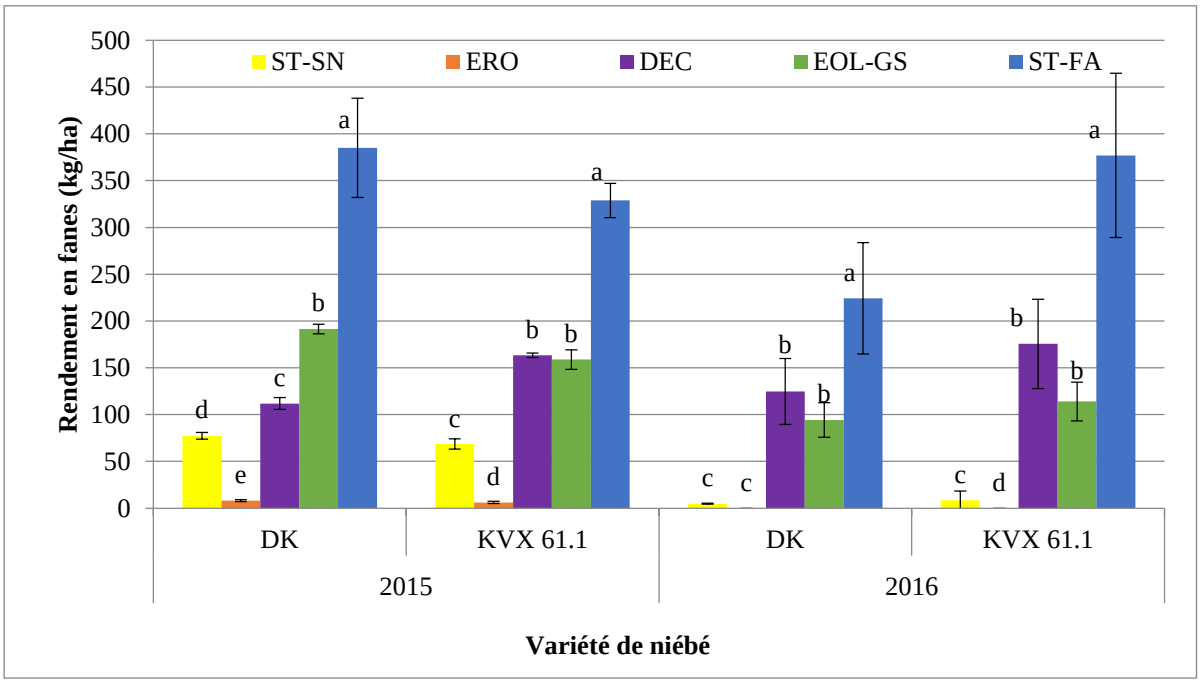
Tableau 39: Analyse de variance entre 2015 et 2016 de la formation des nodules des variétés de niébé en fonction des EHS sur le site de Banizoumbou

			Nodosités totales			
DK	Source	DDL	Somme des carrés	Moyenne des carrés	F	Pr > F
	Modèle	9	9016,435	1001,826	9,304	**< 0,0001**
	Erreur	43	4629,867	107,671		
	Total corrigé	52	13646,302			
KVX 61-1	Source	DDL	Somme des carrés	Moyenne des carrés	F	Pr > F
	Modèle	9	21688,042	2409,782	9,047	**< 0,0001**
	Erreur	45	11985,667	266,348		
	Total corrigé	54	33673,709			
			Nodosités fonctionnelles			
DK	Modèle	9	25086,198	2787,355	13,656	**< 0,0001**
	Erreur	43	8776,783	204,111		
	Total corrigé	52	33862,981			
KVX 61-1	Source	DDL	Somme des carrés	Moyenne des carrés	F	Pr > F
	Modèle	9	35829,994	3981,110	9,239	**< 0,0001**
	Erreur	45	19390,733	430,905		
	Total corrigé	54	55220,727			

7.3.2.2. Rendement en fanes et en grains du niébé

La figure 85 présente le rendement en fanes des variétés de niébé DK et KVX 61-1 en fonction des EHS en 2015 et 2016. L'analyse de variance de la production de fanes par année des EHS et par variété montre qu'il y a une différence significative ($p < 0,05$) de rendement en fanes entre les EHS. Le test de comparaison multiple montre que le rendement en fanes au cours des deux années culturales est significativement plus important quelle que soit la variété de niébé sur l'entité ST-FA par rapport aux EHS et les rendements plus faibles sur ERO. Le rendement en fanes au cours de l'année culturale 2015 sur les entités de types EOL-GS et DEC a varié de 111 à 190 kg/ha. Ces rendements sont significativement plus élevés que ceux obtenus sur ST-SN et ERO. La figure 86 montre la contrainte à la levée du niébé sur les entités ERO et ST-SN. Entre les deux saisons culturales, l'analyse de variance présentée dans le tableau 40 et en annexe 3, montre que la différence est significative entre les rendements

en fanes sur les EHS d'une année à aune autre (p < 0,0001). L'entité ST-FA affiche les rendements les plus élevés quelle que soit la variété de niébé considérée (378-385 kg/ha pour la variété DK et 329-376 kg/ha pour la variété KVX 61-1). Ces rendements sont proches des rendements moyens en fanes de niébé en milieu paysan au Niger mesurés par Yoka et al. (2014), qui est de l'ordre de 400 kg/ha. De manière générale, la tendance globale du rendement en fanes du niébé en fonction des EHS est la suivante : ST-FA > EOL-GS = DEC > ST-SN > ERO.



Les histogrammes ayant la même lettre en commun pour chaque variété de niébé pour chaque année culturale ne sont pas significativement différents au seuil de p = 0.05

Figure 85: Rendement en fanes des variétés de niébé DK et KVX 61-1 en fonction des EHS en 2015 et 2016 à Banizoumbou

Les histogrammes ayant la même lettre en commun pour chaque variété de niébé pour chaque année culturale ne sont pas significativement différents au seuil de p = 0.05

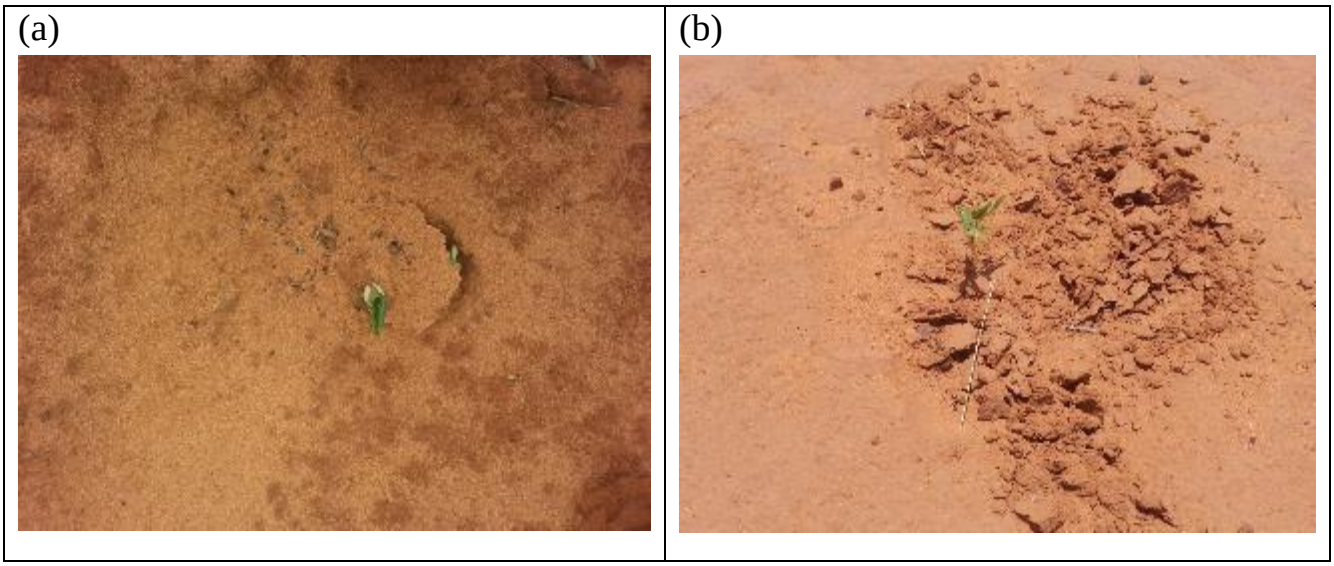


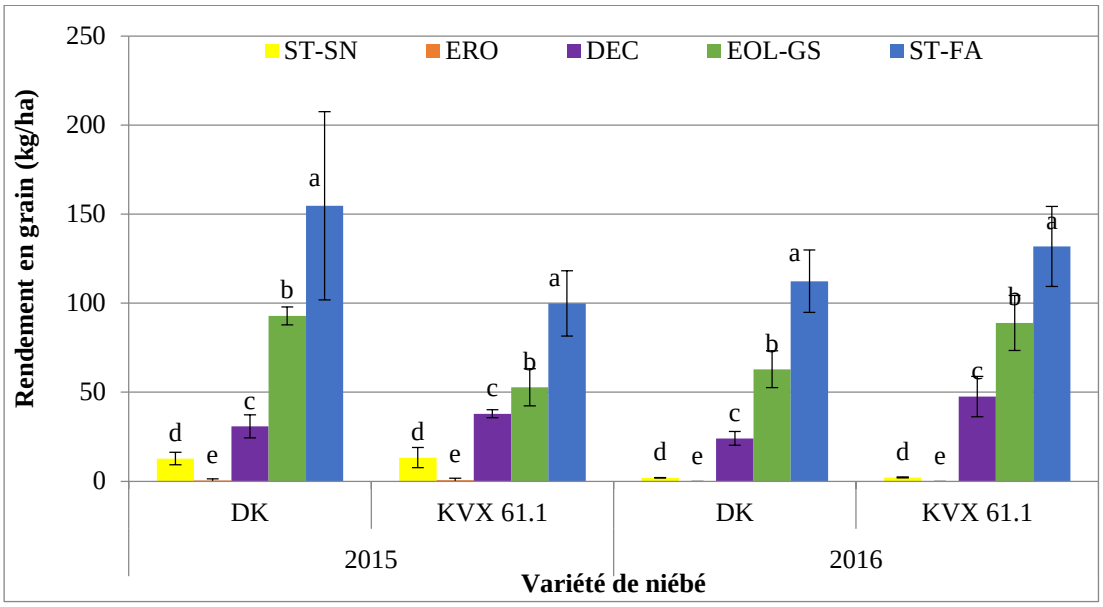
Figure 86: Levée du niébé. (a) Sur une entité de type ST-SN, (b) Sur une entité de type ERO

Tableau 40: Analyse de variance entre le rendement en fanes des variétés de niébé au cours des années culturales 2015 et 2016

	Source	DDL	Somme des carrés	Moyenne des carrés	F	Pr > F
DK	Modèle	9	978381,778	108709,086	62,537	**< 0,0001**
	Erreur	43	74747,316	1738,310		
	Total corrigé	52	1053129,094			
KVX 61-1	Modèle	9	554569,906	61618,878	60,274	**< 0,0001**
	Erreur	45	46004,269	1022,317		
	Total corrigé	54	600574,175			

La figure 87 illustre le rendement en grains des variétés de niébé DK et KVX 61-1 en 2015 et 2016 sur le site de Banizoumbou. Le test de comparaisons multiples montre qu'en 2015 et 2016, l'entité ST-FA est toujours significativement plus productive en grains (112-155kg/ha pour la variété DK et 100-131 kg/ha pour la variété KVX 61-1) que les autres EHS. L'EHS de type ERO est l'entité de surface la moins productive (0-1 kg/ha). Le rendement en grains sur les entités de type ST-SN est compris entre 2 et 13 kg/ha pour la variété DK et 2,2 et 13 kg/ha pour la variété KVX61.1. Ces valeurs sont inférieurs au rendement moyen en grains du niébé en milieu paysan au Niger qui est de 120 kg/ha (Yoka *et al.,* 2014). L'analyse de variance montre que la production en grains du niébé est variable entre les saisons

culturales (p < 0,0001 ; tableau 41 et en annexe 3). De manière générale, la tendance globale de la production en grains du niébé en fonction des EHS est la suivante : ST-FA>EOL-GS>DEC>ST-SN>ERO.



Les histogrammes ayant la même lettre en commun pour chaque variété de niébé pour chaque année culturale ne sont pas significativement différents au seuil de p = 0.05

Figure 87 : Rendement en grains des variétés de niébé DK et KVX 61-1 en fonction des EHS en 2015 et 2016 à Banizoumbou

Tableau 41 : analyse de variance du rendement en fanes des variétés de niébé en fonction des EHS sur le site de Banizoumbou entre 2015 et 2016

DK	Source	DDL	Somme des carrés	Moyenne des carrés	F	Pr > F
	Modèle	9	97271,191	10807,910	125,011	**< 0,0001**
	Erreur	45	3890,500	86,456		
	Total corrigé	54	101161,691			
KVX 61-1						
	Modèle	9	151490,549	16832,283	52,603	**< 0,0001**
	Erreur	43	13759,337	319,985		
	Total corrigé	52	165249,886			

7.3.3. Nodulation et production du niébé sur le site de Sadoré

7.3.3.1. Formation des nodules

Le nombre de nodules totaux et fonctionnels des variétés DK et KVX 61-1 sont présentés dans le tableau 42. Le test de comparaisons multiples montre que le nombre des nodules totaux et fonctionnels formés par les variétés de niébé durant les années culturales 2015 et 2016 et entre les années (Tableau 43) sont toujours significativement plus élevés ($p < 0,05$) sur l'entité ST-FA (36-78 nodules/plant pour la variété LS et 50-79 nodules/plant pour la variété KVX 61-1) que sur les autres EHS. Le nombre de nodules observés sur les entités de type ST-SN, EOL-GS et DEC varie entre 35 et 76 nodules/plant pour la variété LS, et entre 48 et 75 nodules/plant pour la variété KVX 61-1. Le plus faible nombre de nodules est enregistré sur ERO où la nodulation semble être fortement contrariée (entre 0 et 7 nodules par plant).

Tableau 42 : Nombre de nodules totaux et fonctionnels formés par plant des variétés LS et KVX 61-1 en fonction des EHS à Sadoré en 2015 et 2016

Nombre de nodules totaux (nodules/plant)				
	2015		**2016**	
Entités de surface	**LS**	**KVX 61-1**	**LS**	**KVX 61-1**
ST-SN	20b	16b	15b	20b
ERO	0a	1a	1a	7a
DEC	13b	19bc	25c	22b
EOL-GS	23bc	27bcd	43c	48c
ST-FA	36c	50d	78d	79d
p	0,0001	0,0001	0,0001	0,0001
Nombre de nodules fonctionnels (nodules/plant)				
ST-SN	19b	15b	13ab	16b
ERO	0a	1a	1a	6a
DEC	10b	14b	21abc	19b
EOL-GS	20b	26bcd	38c	42c
ST-FA	35c	48d	76d	75d
p	0,0001	0,0001	0,0001	0,0001

Les chiffres suivis de la même lettre dans la même colonne ne sont pas significativement différents au seuil de $p = 0.05$

Tableau 43 : Analyse de variance de la formation des nodules des variétés de niébé en fonction des EHS sur le site de Sadoré entre 2015 et 2016

			Nodosités totales			
LS	Source	DDL	Somme des carrés	Moyenne des carrés	F	Pr > F
	Modèle	9	28008,142	3112,016	49,738	**< 0,0001**
	Erreur	45	2815,567	62,568		
	Total corrigé	54	30823,709			
KVX 61-1	Source	DDL	Somme des carrés	Moyenne des carrés	F	Pr > F
	Modèle	9	27874,745	3097,194	37,561	**< 0,0001**
	Erreur	45	3710,600	82,458		
	Total corrigé	54	31585,345			
			Nodosités fonctionnelles			
LS	Source	DDL	Somme des carrés	Moyenne des carrés	F	Pr > F
	Modèle	9	26600,076	2955,564	42,546	**< 0,0001**
	Erreur	45	3126,033	69,467		
	Total corrigé	54	29726,109			
KVX 61-1	Source	DDL	Somme des carrés	Moyenne des carrés	F	Pr > F
	Modèle	9	9009225,470	1001025,052	133,393	**< 0,0001**
	Erreur	45	337695,878	7504,353		
	Total corrigé	54	9346921,348			

7.3.3.2. Production du niébé

La figure 88 présente le rendement en fanes des variétés de niébé LS et KVX 61-1 en fonction des EHS en 2015 et 2016 sur le site de Sadoré. L'analyse de variance montre qu'il y a une différence significative ($p < 0,05$) de rendement en fanes entre les différentes EHS. Cela traduit la variabilité des rendements en fanes dans les parcelles agricoles. On constate une variation interannuelle des rendements en fanes (tableau 44 et en annexe 3 ; $p < 0,0001$). Les rendements sont significativement plus importante en 2016 qu'en 2015 quelle

que soit la variété de niébé. Celle-ci est en rapport avec les bonnes conditions pluviométriques et les faibles attaques parasitaires observées en 2016 sur le site de Sadoré.

Le test de comparaisons multiples des moyennes montre que les entités EOL-GS et ST-FA sont les plus productives durant l'année culturale 2015 (ST-FA : 468 kg/ha pour la variété LS et 348 pour la KVX 61-1 ; EOL-GS : 390 kg/ha pour la LS et 268 kg/ha pour la KVX 61.1). Les entités ERO enregistrent les plus faibles rendements. Pour l'année 2016, l'entité ST-FA est largement la plus productive avec des rendements de 1986 kg/ha pour la variété LS et 1226 kg/ha pour la variété KVX 61-1. La production est toujours faible sinon nul sur l'entité ERO quelle que soit la variété de niébé. Les entités de type ST-SN présentent des rendements moyens en dessous de 400 kg/ha, c'est-à-dire en dessous du rendement moyen de niébé en milieu paysan au Niger. Les rendements des surfaces de type DEC et EOL-GS ne présentent pas de différence significative (791 et 901 kg/ha). Ces surfaces présentent une meilleure aptitude à la production du niébé par rapport aux surfaces de référence ST-SN entre 209 et 311 kg/ha).

De manière générale, la tendance globale du rendement en fanes du niébé en fonction des EHS est la suivante : ST-FA > EOL-GS = DEC > ST-SN > ERO.

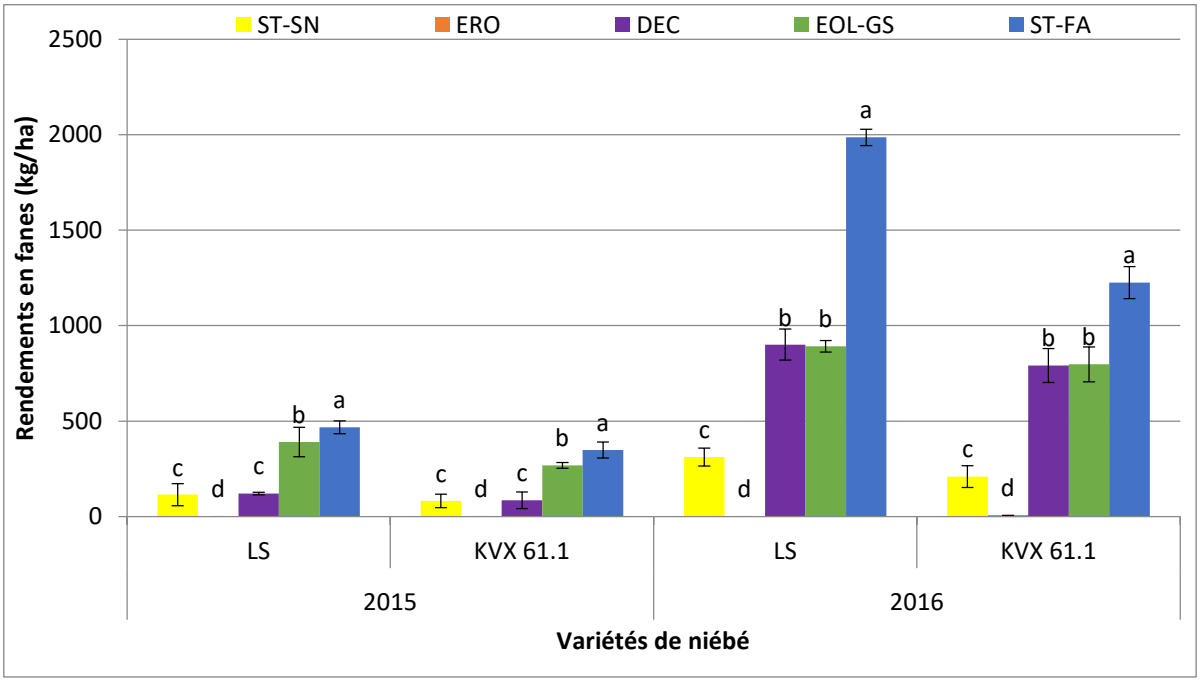


Figure 88 : Rendement en fanes des variétés de niébé LS et KVX 61-1 en fonction des EHS en 2015 et 2016 à Sadoré. ***Les histogrammes ayant la même lettre en commun pour***

chaque variété de niébé pour chaque année culturale ne sont pas significativement différents au seuil de p = 0.05

Tableau 44 : analyse de variance du rendement en fanes des variétés de niébé en fonction des EHS sur le site de Sadoré entre 2015 et 2016

LS	Source	DDL	Somme des carrés	Moyenne des carrés	F	Pr > F
	Modèle	9	19513178,597	2168130,955	731,405	**< 0,0001**
	Erreur	45	133395,121	2964,336		
	Total corrigé	54	19646573,718			
KVX 61-1						
	Modèle	9	9009225,470	1001025,052	133,393	**< 0,0001**
	Erreur	45	337695,878	7504,353		
	Total corrigé	54	9346921,348			

La figure 89 présente le rendement en grains des variétés de niébé LS et KVX 61-1 sur le site de Sadoré en 2015 et 2016. L'analyse de variance montre des différences significative de rendement en grains de niébé entre les entités de surface ($p < 0,05$) et entre les deux années culturales 2016 2015 quelle que soit la variété de niébé ($p < 0,0001$; tableau 45 et annexe 3)

Pour la saison culturale 2015, les rendements les plus élevés sont obtenus sur ST-FA pour la variété LS (162 kg/ha). Les rendements en grains sur ST-SN, EOL-GS et DEC ne sont pas significativement différents (21 et 64 kg/ha pour la LS et 14 et 40 pour la KVX 61-1). Les rendements en grains sur les surfaces de type ERO sont nuls. En 2016, les rendements obtenus sur les surfaces ST-FA (666 kg/ha pour la LS et 450 kg/ha pour la KVX 61-1) sont 5 et 3 fois plus élevés que ceux obtenus en milieu paysans au Niger (120 kg/ha). Les rendements obtenus sur DEC et EOL-GS sont également plus élevées que ces valeurs de référence qui sont supérieures à ceux obtenus sur ST-SN (109 kg/ha pour la LS et 81 kg/ha pour la KVX 61-1).

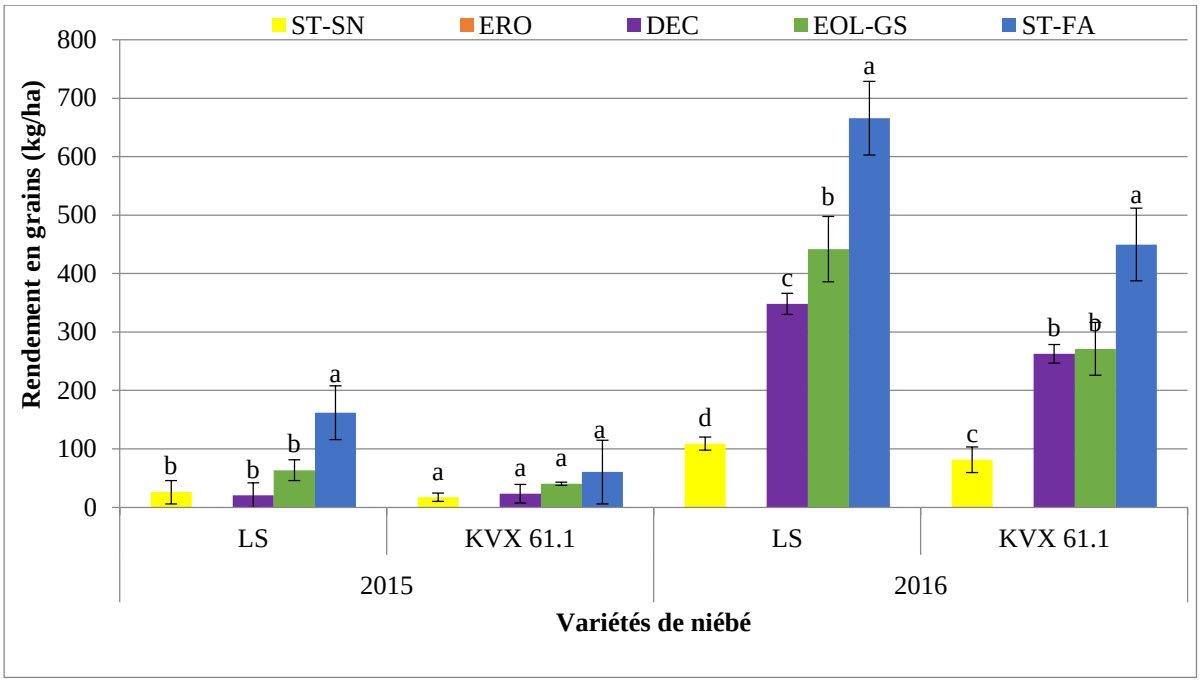


Figure 89 : Rendement en grains des variétés de niébé LS et KVX 61-1 en 2015 et 2016 à Sadoré. ***Les histogrammes marqués par la même lettre pour une même variété de niébé et une même année culturale ne sont pas significativement différents au seuil de p = 0.05.***

Tableau 45 : Analyse de variance entre les rendements en grains des variétés de niébé en 2015 et 2016 sur le site de Sadoré.

LS	**Source**	**DDL**	**Somme des carrés**	**Moyenne des carrés**	**F**	**Pr > F**
	Modèle	9	1222973,560	135885,951	131,922	**< 0,0001**
	Erreur	45	46352,317	1030,051		
	Total corrigé	54	1269325,877			
KVX 61-1	Source	DDL	Somme des carrés	Moyenne des carrés	F	Pr > F
	Modèle	9	2685151,885	298350,209	261,541	**< 0,0001**
	Erreur	45	51333,376	1140,742		
	Total corrigé	54	2736485,261			

7.3.4. Nodulation et production du niébé sur le site d'Arraourayé

7.3.4.1. Formation des nodules

Les nodules totaux et fonctionnels dénombrés sur les variétés Dan Zahi et KVX 61-1 sont indiqués dans le tableau 46. En 2015 aucune différence significative n'est observée

entre les EHS. Le tableau 47 montre qu'il est la significative d'une année à une autre entre les entités de surface. Les valeurs moyennes obtenues en 2015 sont en outre plus élevées sur DEC (72 nodules par plant pour Dan Zahi et 54 nodules par plant pour la KVX 61-1) comparée à ST-SN, EOL-GS et ST-FA où elles varient entre 26 et 56 nodules par plant. La formation des nodules du niébé en 2016 varie significativement d'une EHS à une autre selon l'analyse de variance ($p < 0,05$). Le test de comparaisons multiples montre que les EHS avec le nombre de nodules totaux et fonctionnels les plus importants sont par ordre décroissant : ST-F, ST-FA, DEC et EOL-GS. Par ailleurs, les EHS avec les plus faibles nombres de nodules totaux et fonctionnels sont les surfaces de référence ST-SN (10-28 nodules/plant).

Tableau 46 : Nombre de nodules totaux et fonctionnels formés par plant sur les variétés DK et KVX 61-1 à Arraourayé en 2015 et 2016

Nombre de nodules totaux (nodules/plant)				
	2015		**2016**	
Entités de surface	Dan Zahi	KVX 61-1	Dan Zahi	KVX 61-1
ST-SN	28a	20a	14a	10a
DEC	72a	54b	47bc	35b
EOL-GS	32a	37ab	39bc	36b
ST-FA	26a	18a	54c	59c
ST-F	56a	32ab	64c	49bc
p	0,08	0,002	0,0001	0,0001
Nombre de nodules fonctionnels (nodules/plant)				
ST-SN	23a	16a	12a	7a
DEC	62a	42b	43b	30b
EOL-GS	27a	26ab	34b	28b
ST-FA	21a	16a	48bc	51c
ST-F	45a	23ab	57c	43bc
p	0,15	0,01	0,0001	0,0001

Les chiffres suivis de la même lettre dans la même colonne ne sont pas significativement différents au seuil de $p = 0.05$ selon le test de Scheffé

Tableau 47 : Analyse de variance entre 2015 et 2016 de la formation des nodules des variétés de niébé sur le site de Arraourayé

			Nodosités totales			
Dan Zahi	Source	DDL	Somme des carrés	Moyenne des carrés	F	Pr > F
	Modèle	9	27398,612	3044,290	5,085	**< 0,0001**
	Erreur	45	26943,133	598,736		
	Total corrigé	54	54341,745			
KVX 61-1	Source	DDL	Somme des carrés	Moyenne des carrés	F	Pr > F
	Modèle	9	12665,900	1407,322	14,330	**< 0,0001**
	Erreur	43	4222,817	98,205		
	Total corrigé	52	16888,717			
Dan Zahi			Nodosités fonctionnelles			
	Modèle	9	21614,176	2401,575	5,111	**< 0,0001**
	Erreur	45	21145,533	469,901		
	Total corrigé	54	42759,709			
KVX 61-1	Source	DDL	Somme des carrés	Moyenne des carrés	F	Pr > F
	Modèle	9	12665,900	1407,322	14,330	**< 0,0001**
	Erreur	43	4222,817	98,205		
	Total corrigé	52	16888,717			

7.3.4.2. Production du niébé

La figure 90 illustre le rendement en fanes des variétés de niébé Dan Zahi et KVX 61-1 en fonction des EHS en 2015 et 2016 sur le site de Arraourayé. Les résultats révèlent une différence significative de rendement en fanes entre les EHS ($p < 0,05$) durant les deux années culturales. En moyenne, les surfaces ST-F présentent les meilleurs rendements en fanes des variétés Dan Zahi et KVX 61-1 et les surfaces de référence ST-SN présentent les plus faibles rendements. On note cependant une large dispersion des résultats de rendement en fanes sur les surfaces DEC, EOL-GS et ST-F en 2015. Les rendements en niébé sont faibles sur les surfaces ST-FA en raison des multiples associations de culture opérées, notamment avec le mil, le sorgho, le maïs, le sésame, l'hibiscus et même de l'arachide pour profiter de la fertilité de cette entité, déjà bien connue des paysans. Le test de comparaisons multiples des moyennes pour l'année 2016 a montré que les rendements entre les entités

DEC, EOL-GS, ST-FA et ST-F ne sont pas significativement différents avec toutefois des valeurs moyennes légèrement plus élevées sur ST-F (594 kg/ha pour la variété Dan Zahi et 441 kg/ha pour la variété KVX 61-1). Ces valeurs sont proches des valeurs moyennes de rendement en fanes obtenues en milieu paysan au Niger mesurées par Yoka *et al.*, (2014). Les valeurs de rendement les plus faibles sont obtenues sur ST-SN et entre 18 et 224 kg/ha entre les variétés de niébé.

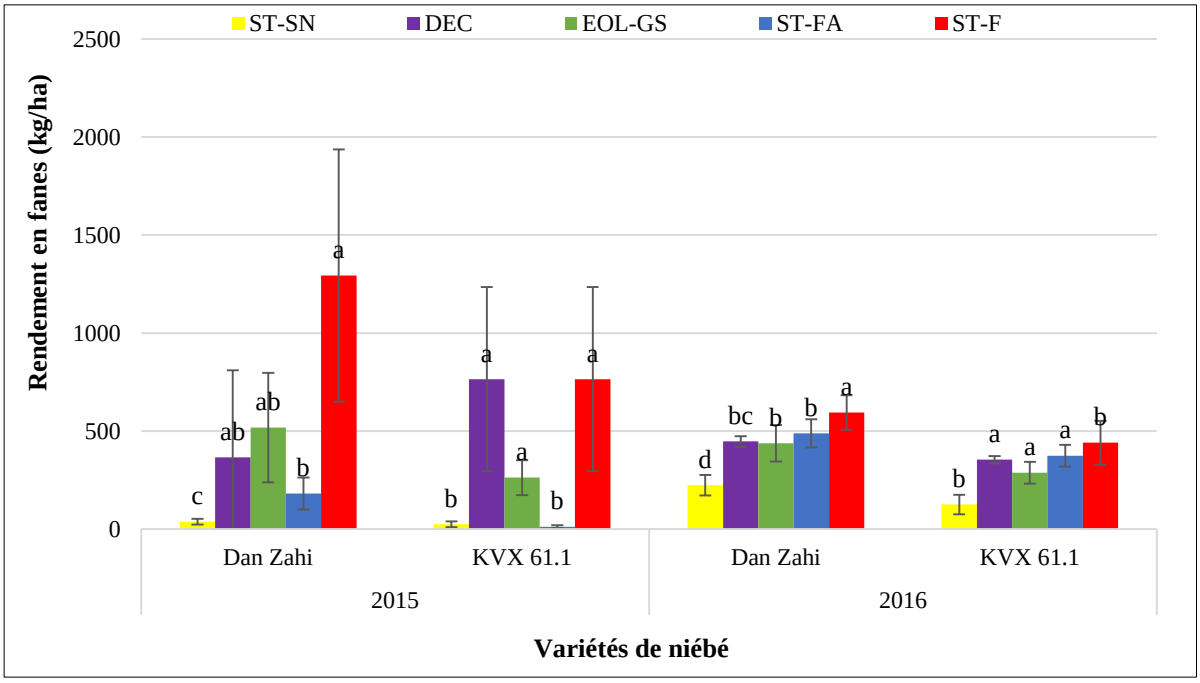


Figure 90 : Rendement en fanes des variétés de niébé Dan Zahi et KVX 61-1 en fonction des EHS en 2015 et 2016 à Arraourayé. *Les histogrammes ayant la même lettre en commun pour chaque variété de niébé pour chaque année culturale ne sont pas significativement différents au seuil de p = 0.05*

La figure 91 illustre le rendement en grains des variétés de niébé Dan Zahi et KVX 61-1 en fonction des EHS. On observe une différence significative des rendements en grains des deux variétés d'une entité à une autre pour chaque saison culturale ($p < 0,05$). Durant les saisons culturales 2015 et 2016, les rendements des variétés de niébé ne sont pas significativement différents entre les entités DEC, EOL-GS, ST-FA et ST-F ($p < 0,001$; tableau 48). Toutefois, les valeurs moyennes des rendements sont plus élevées sur ST-F (702 kg/ha pour la variété Dan Zahi et 310 kg/ha pour la variété KVX 61-1). Les rendements les plus faibles ont été obtenus sur ST-SN. Les rendements relativement faibles observés sur ST-FA

s'explique par la forte compétition due aux multiples cultures associées au niébé opérée par les producteurs sur cette entité. Une tendance à la baisse des rendements est observée de manière générale en 2016 due la faible pluviométrie et aux attaques multiformes des ennemis de la culture.

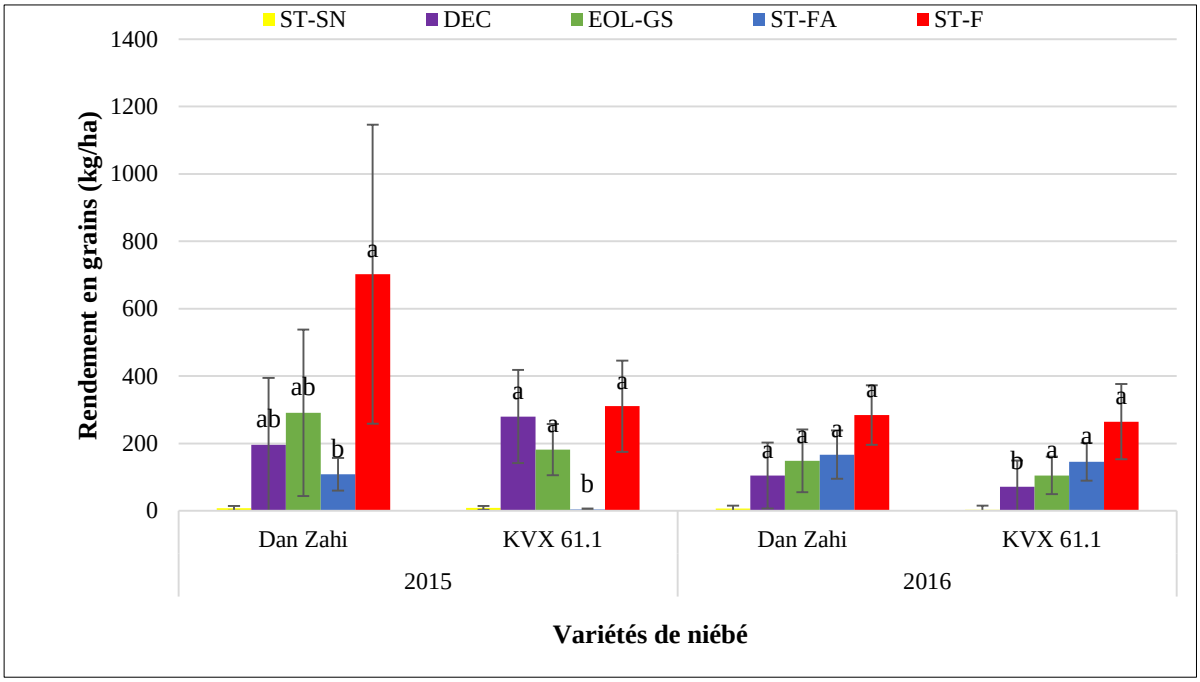


Figure 91 : Rendement en grains des variétés de niébé Dan Zahi et KVX 61-1 en 2015 et 2016 à Arraourayé. ***Les histogrammes ayant en commun la même lettre pour une même variété de niébé et au cours d'une même année culturale ne sont pas significativement différents au seuil de p = 0.05.***

Tableau 48 : Analyse de variance entre les rendements en grains des variétés de niébé en 2015 et 2016 sur le site de Arraourayé

Dan Zahi	Source	DDL	Somme des carrés	Moyenne des carrés	F	Pr > F
	Modèle	9	6593268,356	732585,373	11,701	**< 0,0001**
	Erreur	45	2817401,001	62608,911		
	Total corrigé	54	9410669,357			
KVX 61-1	Source	DDL	Somme des carrés	Moyenne des carrés	F	Pr > F
	Modèle	9	3580274,709	397808,301	20,166	**< 0,0001**
	Erreur	43	848238,189	19726,470		
	Total corrigé	52	4428512,897			

7.3.5. Nodulation et production du niébé sur le site de Tarna

7.3.5.1. Formation des nodules

Le tableau 49 présente le nombre de nodules totaux et fonctionnels par plant pour les variétés Bartha et KVX 61-1, en fonction des EHS, durant les saisons culturales 2015 et 2016. Il existe une différence significative du nombre de nodules formées sur les EHS par les deux variétés de niébé durant l'année culturale 2016 ($p<0,05$). Aucune différence significative n'est observée entre le nombre de nodules formées durant l'année culturale 2015 sur les EHS par la variété KVX 61-1. Sur les entités des sols ferrugineux tropicaux, les résultats révèlent que c'est sur les surfaces ST-FA et ST-F qu'on observe les plus grands nombres de nodules totaux. Les valeurs les plus faibles ont été mesurées sur ST-SN. Sur les EHS des alluvions du *Goulbi*, le développement des nodules est plus important sur DEC-AL que DEC-AL-FA. En comparant la formation des nodules entre les EHS des deux types de sol, il ressort que ST-FA et ST-F sur les sols ferrugineux sont plus favorables au développement des nodules. L'analyse de variance entre les saisons culturales 2015 et 2016, fait ressortir une variation interannuelle de la formation des nodules (tableau 50 et en annexe 3 ; $p < 0,0001$).

Tableau 49 : Nombre de nodules totaux et fonctionnels formés par plant des variétés DK et KVX 61-1 en fonction des EHS à Tarna en 2015 et 2016.

Nombre de nodules totaux (nodules/plant)				
	2015		2016	
	Bartha	KVX 61-1	Bartha	KVX 61-1
ST-SN	17a	35a	36a	18ab
ST-FA	37b	30a	56b	41c
ST-F	14a	30a	67b	36c
DEC-AL	7a	15a	32a	23b
DEC-AL-FA	7a	19a	11c	8a
p	0,03	0,06	0,0001	0,0001
Nombre de nodules fonctionnels (nodules/plant)				
ST-SN	10a	26a	31a	12ac
ST-FA	33b	28a	50b	37b
ST-F	10a	26a	62b	30b
DEC-AL	6a	14a	27a	19c
DEC-AL-FA	4a	17a	10c	7a
p	0,03	0,21	0,0001	0,0001

Les chiffres suivis de la même lettre dans la même colonne ne sont pas significativement différents au seuil de p = 0.05 selon le test de Scheffé.

Tableau 50 : Analyse de variance entre les nombres de nodules formés par les variétés de niébé en 2015 et 2016 en fonction des EHS sur le site de Tarna.

	Nodosités totales					
Bartha	Source	DDL	Somme des carrés	Moyenne des carrés	F	Pr > F
	Modèle	9	23564,447	2618,272	20,144	**< 0,0001**
	Erreur	41	5329,200	129,980		
	Total corrigé	50	28893,647			
KVX 61-1	Source	DDL	Somme des carrés	Moyenne des carrés	F	Pr > F
	Modèle	9	4366,700	485,189	6,410	**< 0,0001**
	Erreur	40	3027,800	75,695		
	Total corrigé	49	7394,500			
Bartha	**Nodosités fonctionnelles**					
	Modèle	9	22380,127	2486,681	19,808	**< 0,0001**
	Erreur	41	5147,167	125,541		
	Total corrigé	50	27527,294			
KVX 61-1	Source	DDL	Somme des carrés	Moyenne des carrés	F	Pr > F
	Modèle	9	3611,700	401,300	5,350	**< 0,0001**
	Erreur	40	3000,300	75,008		
	Total corrigé	49	6612,000			

7.3.5.2. Production du niébé

La figure 92 illustre les rendements en fanes des variétés Bartha et KVX 61-1 en fonction des EHS sur le site de Tarna. L'analyse de variance réalisée sur les rendements en fanes (tableau 51 et en annexe 3) montre qu'il existe une différence significative entre les EHS ($p < 0,05$) et entre les deux saisons culturales ($p < 0,0001$). Sur les sols ferrugineux de Tarna, les rendements au cours des deux saisons culturales 2015 et 2016 sur ST-F varient entre 3196 kg/ha et 3357 kg/ha pour la variété Bartha et 1567 kg/ha et 663 kg/ha pour la variété KVX 61-1. Ces rendements élevés se traduisent par un recouvrement fourrager important autour de ST-F (figure 93). En 2015, les variétés de niébé produisent plus de fanes sur ST-SN que sur ST-FA, mais cette différence n'est pas significative. Cette observation n'était pas attendu et pourrait s'expliquer par le fait que les producteurs ont associé plusieurs cultures avec le niébé sur l'EHS ST-FA. La compétition avec ces autres cultures a pu provoquer une baisse de

la production du niébé et donc ces valeurs inattendues. En 2016, lorsque les deux variétés de niébé sont associées uniquement au mil, comme sur les autres sites d'étude, les surfaces ST-SN deviennent moins productives que les surfaces de type ST-FA. Sur les alluvions de Tarna, les résultats révèlent qu'en général les rendements en fanes sont plus importants sur DEC-AL (1651 kg/ha pour la variété Bartha et 854 kg/ha pour la KVX 61-1) et plus faibles sur DEC-AL-FA (156 kg/ha pour la variété Bartha et 35 kg/ha pour la KVX 61-1). Par ailleurs, on constate que la variété locale Bartha produit plus de fane que la variété améliorée KVX 61-1.

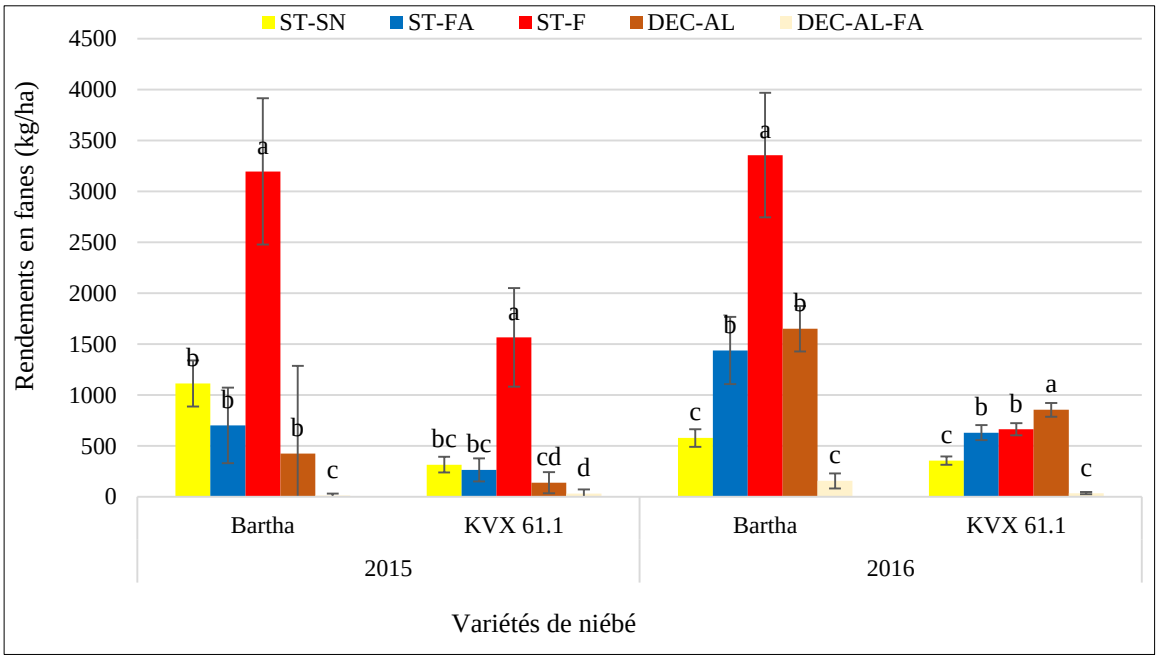


Figure 92 : Rendement en fanes des variétés de niébé Dan Zahi et KVX 61-1 en fonction des EHS en 2015 et 2016 à Tarna. ***Les histogrammes ayant en commun la même lettre pour une même variété de niébé et pour la même année culturale ne sont pas significativement différents au seuil de p = 0.05***

Figure 93 : Vue d'une parcelle expérimentale installée sur une EHS de type ST-F sur le site de Tarna (Région de Maradi). A noter la couverture de la surface du sol par la variété locale Bartha cultivée en association avec le mil.

Tableau 51 : Analyse de variance entre les rendements en fanes des variétés Bartha et KVX 61-1 au cours de la saison culturale 2015 et 2016 sur le site de Tarna.

Bartha	**Source**	**DDL**	**Somme des carrés**	**Moyenne des carrés**	**F**	**Pr > F**
	Modèle	9	60104036,523	6678226,280	93,906	**< 0,0001**
	Erreur	41	2915745,329	71115,740		
	Total corrigé	50	63019781,852			
KVX 61-1	Source	DDL	Somme des carrés	Moyenne des carrés	F	Pr > F
	Modèle	9	4821097,466	535677,496	214,263	**< 0,0001**
	Erreur	40	100003,916	2500,098		
	Total corrigé	49	4921101,382			

Les résultats des rendements en grains des variétés de niébé Bartha et KVX 61-1 en fonction des EHS sont présentés sur la figure 94. On observe une différence significative du rendement en grains de la variété KVX 61-1 ($p < 0,05$) entre les EHS et entre les années culturales ($p < 0,0001$; tableau 52). En 2015, les rendements en grain sont faibles, en particulier pour la variété Bartha (<120 kg/ha). Ceci est peut-être lié au retard de semis sur

ce site et donc de l'allongement du temps nécessaire pour la maturité du niébé. En effet, la période de maturité avait coïncidé avec le relâchement des animaux alors que la majorité des plants de niébé n'avaient pas encore bouclée leur cycle, surtout la variété locale Bartha à cycle long. La tendance est plus claire en 2016. Pendant cette campagne, les résultats révèlent que parmi les EHS sur les sols ferrugineux du site, les rendements les importants ont été enregistrés sur les EHS de type ST-F (421 kg/ha pour la variété Bartha et 273 pour la KVX 61-1) alors que ST-SN enregistrent les plus faibles (101 kg/ha pour Bartha et 67 kg/ha pour la KVX 61-1). Sur les alluvions, les résultats montrent que les rendements sont plus importants sur DEC-AL (141 kg/ha pour la variété Bartha et 121 kg/ha pour la KVX 61-1) tandis qu'ils sont presque nuls sur DEC-AL-FA. En comparant l'ensemble des EHS, on retient que les rendements les plus élevés sont obtenus sur l'EHS ST-F quelle que soit la variété, viennent ensuite les surfaces ST-FA qui enregistrent les plus fortes valeurs de rendements en grains mais qui sont relativement dans le même ordre de grandeur que celles obtenues sur DEC-AL pour la KVX 61-1. Enfin, on note que les surfaces ST-SN sont plus favorables à la production en grain du niébé que DEC-AL-FA. Le développement anarchique des mauvaises herbes et la compétition de prélèvement en différents nutriments (comme le phosphore, le potassium, l'azote), associé aux attaques des ennemies de la culture de niébé expliquent ce rendement nul sur DEC-AL-FA (figure 95).

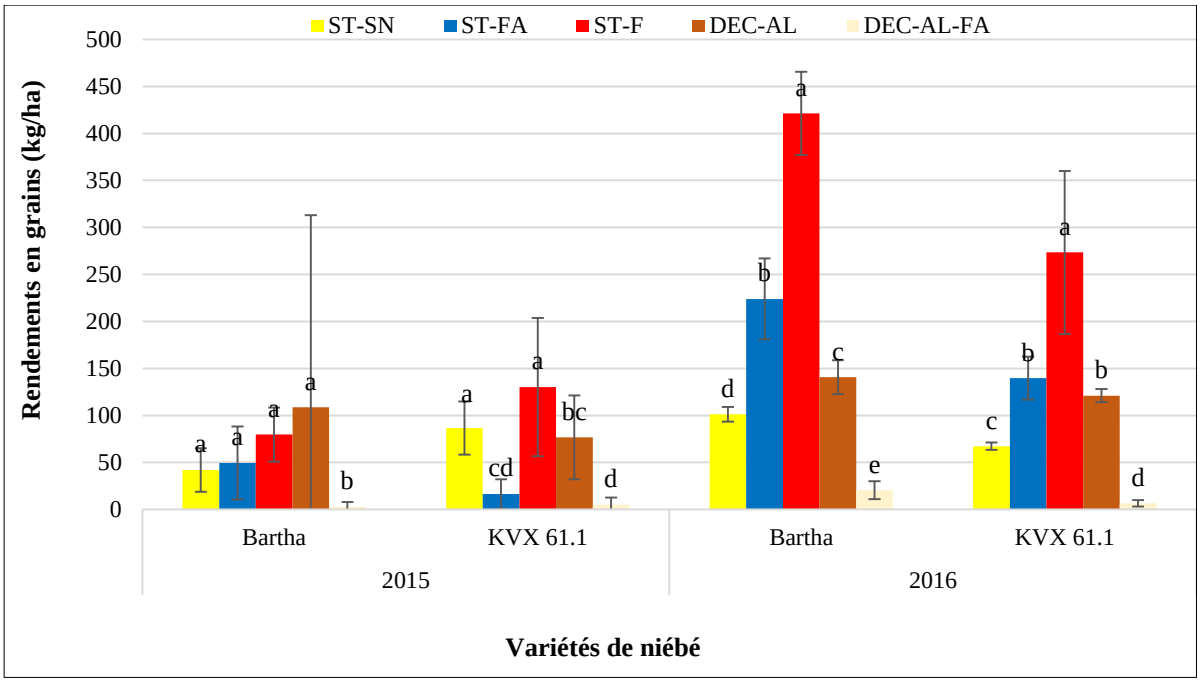


Figure 94 : Rendement en grains des variétés de niébé Dan Zahi et KVX 61-1 en fonction des EHS en 2015 et 2016 à Tarna ***Les histogrammes ayant en commun la même lettre pour une même variété de niébé et une même année culturale ne sont pas significativement différents au seuil de p = 0.05.***

Figure 95 : Forte croissance des mauvaises herbes sur DEC-AL-FA

La surface DEC-AL-FA pourrait cependant être favorable à la production de biomasse, à l'activité biologique et à la fertilité des sols.

Tableau 52: Analyse de variance entre les rendements en grains des variétés de niébé de 2015 et 2016 sur le site de Tarna.

Bartha	**Source**	**DDL**	**Somme des carrés**	**Moyenne des carrés**	**F**	**Pr > F**
	Modèle	9	28214904,438	3134989,382	26,918	**< 0,0001**
	Erreur	41	4775020,927	116463,925		
	Total corrigé	50	32989925,364			
KVX 61-1	Source	DDL	Somme des carrés	Moyenne des carrés	F	Pr > F
	Modèle	9	6115421,303	679491,256	43,211	**< 0,0001**
	Erreur	40	628999,138	15724,978		
	Total corrigé	49	6744420,441			

7.3.6. Analyse comparative de la nodulation et de la production du niébé par les variétés en fonction des EHS et des sites

7.3.6.1. Formation des nodules

On observe une variabilité intra-EHS et intra-annuelle de la formation des nodules des différentes variétés de niébé entre les différents sites d'étude ($p < 0,0001$; figure 96). L'analyse de variance de cette figure permet de montrer que :

- La nodulation sur l'EHS ST-SN est du même ordre de grandeur sur l'ensemble des sites durant la saison culturale 2015. En 2016, les résultats montrent que la nodulation est plus importante sur le site de Tarna que sur les autres sites où elle est relativement similaire ;
- La nodulation sur l'EHS ERO est voisine sur les sites de Banizoumbou et Sadoré pour les saisons culturales 2015 et 2016 (nodulation nulle ou presque) ;
- Pour l'EHS DEC, en général, le nombre de nodules formés est similaire entre les sites sauf sur le site de Arraourayé où la nodulation semble être plus favorable ;
- Sur l'EHS EOL-GS, les variétés de niébés présentent une nodulation relativement proche quelle que soit la saison culturale ;
- Sur l'EHS ST-FA, les valeurs moyennes indiquent que la nodulation est plus importante à Banizoumbou durant la saison culturale 2015 avec une large dispersion des résultats. Durant la saison culturale 2016, c'est à Sadoré qu'a été enregistré le

plus grand nombre de nodulations. Les sites de Banizoumbou, Arraourayé et Tarna montrent des valeurs moyennes de nodulation comparables ;

- Sur l'EHS ST-F, la nodulation des variétés de niébé est plus importante sur le site de Arraourayé que Tarna en 2015. En 2016, cette nodulation est relativement similaire entre ces deux sites entre les variétés locales Bartha (Tarna) et Dan Zahi (Arraourayé) d'une part, et la variété KVX 61.1 d'autre part.

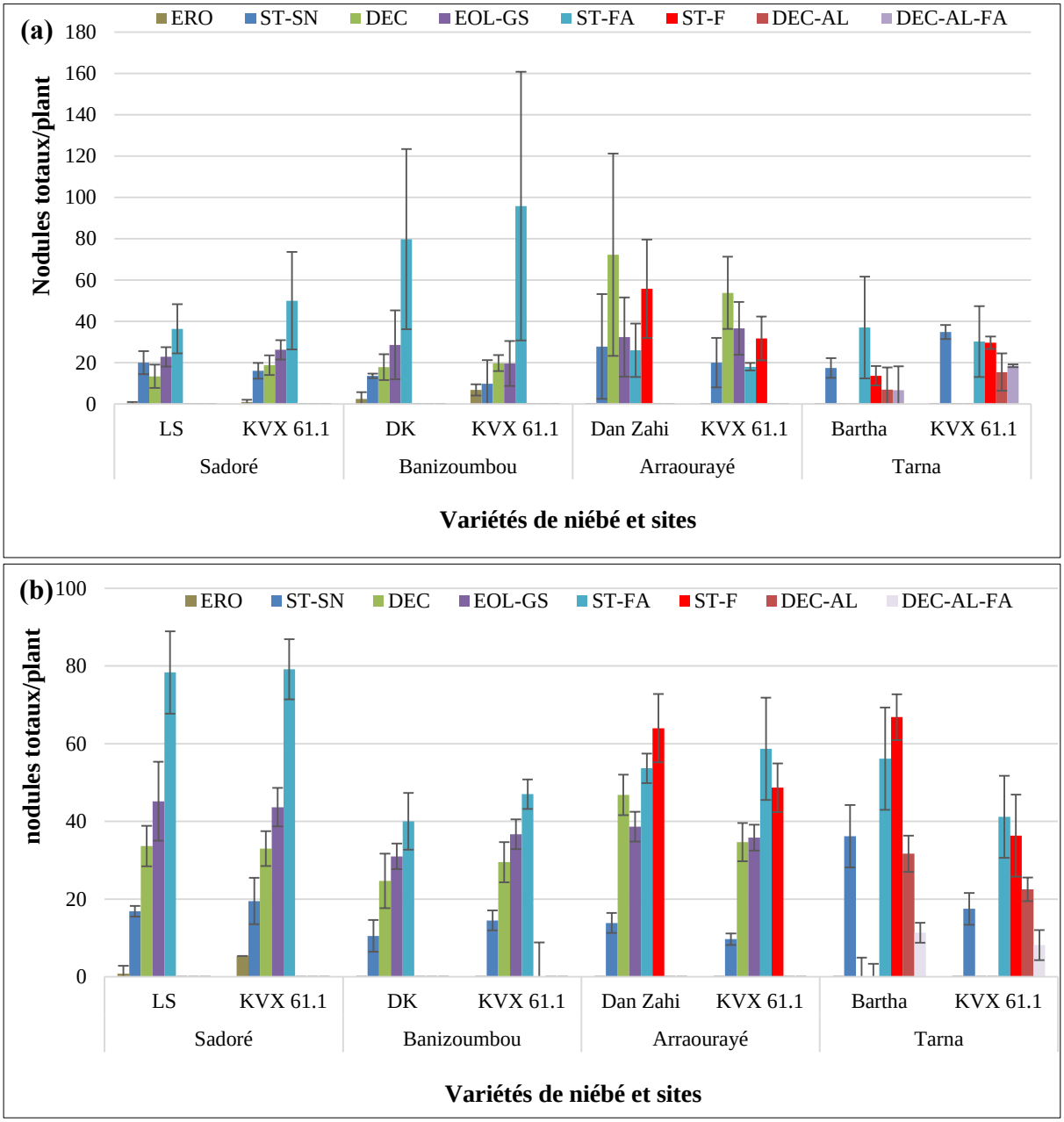


Figure 96: Comparaison des rendements en fanes des variétés de niébé en fonction des EHS des sites (a) en 2015 et (b) en 2016

7.3.6.2. Rendement en fanes

La figure 97 dresse une analyse comparative des rendements en fanes des variétés de niébé en fonction des EHS des sites.

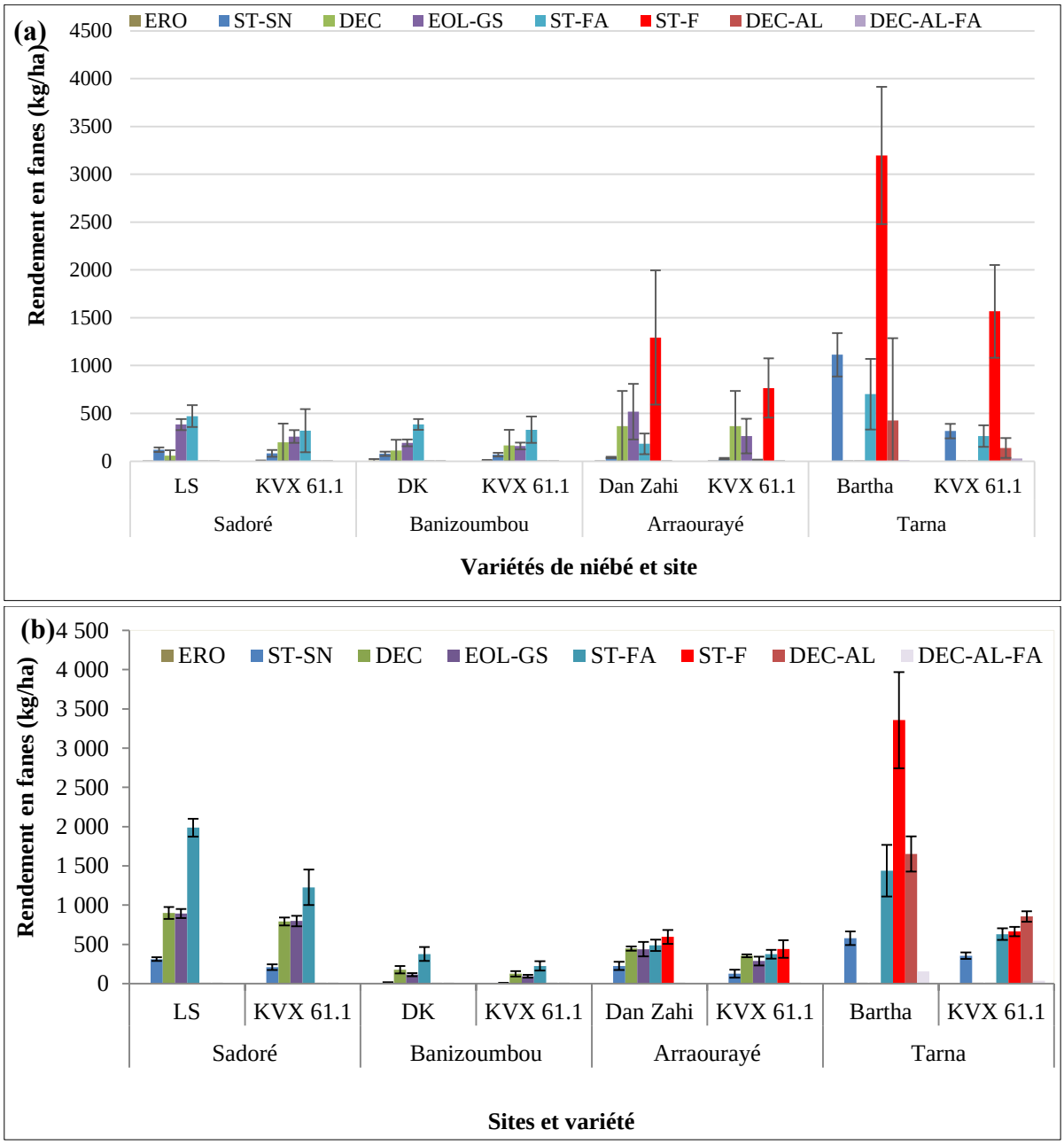


Figure 97: Comparaison des rendements en fanes des variétés de niébé en fonction des EHS et des sites (a) en 2015 et (b) en 2016

Les résultats révèlent une variabilité spatiale au sein des EHS d'un même site, entre les EHS des différents sites, ainsi qu'une variabilité interannuelle des rendements de niébé ($p < 0,0001$). Ainsi on note que :

- Sur l'EHS ST-SN, les rendements enregistrés sont plus importants sur le site de Tarna, suivi du site de Sadoré. Les rendements enregistrés sur les sites de Banizoumbou et de Arraourayé sont similaires;
- Sur l'EHS ERO, aucune variété de niébé n'a pu se développer durant les deux saisons culturales sur les sites de Banizoumbou et Sadoré où ce type d'EHS est présent.
- Sur l'EHS EOL-GS, les valeurs de rendement en fanes les plus élevées ont été enregistrées par ordre d'importance sur les sites de Sadoré et Arraourayé quelle que soit la variété de niébé. Les valeurs les plus faibles ont été obtenues sur le site de Banizoumbou ;
- Sur l'EHS DEC, les moyennes des rendements sont plus élevées sur les sites d'Arraourayé pour la saison culturale 2015 et sur celui de Sadoré pour la saison culturale 2016 ;
- Sur l'EHS ST-FA, les rendements sont plus importants sur le site de Tarna pour la saison culturale 2015 mais nettement plus important sur le site de Sadoré en 2016, quelle que soit la variété de niébé. Le site de Arraourayé enregistre en général les plus faibles rendements en fanes du niébé ;
- Sur l'EHS ST-F, les rendements en fanes obtenus sur le site de Tarna sont plus importants que sur le site d'Arraourayé quelle que soit la variété de niébé ou la saison culturale.

7.3.6.3. Rendement en grains

La figure 98 dresse une analyse comparative des rendements en grains des variétés de niébé en fonction des EHS et des sites.

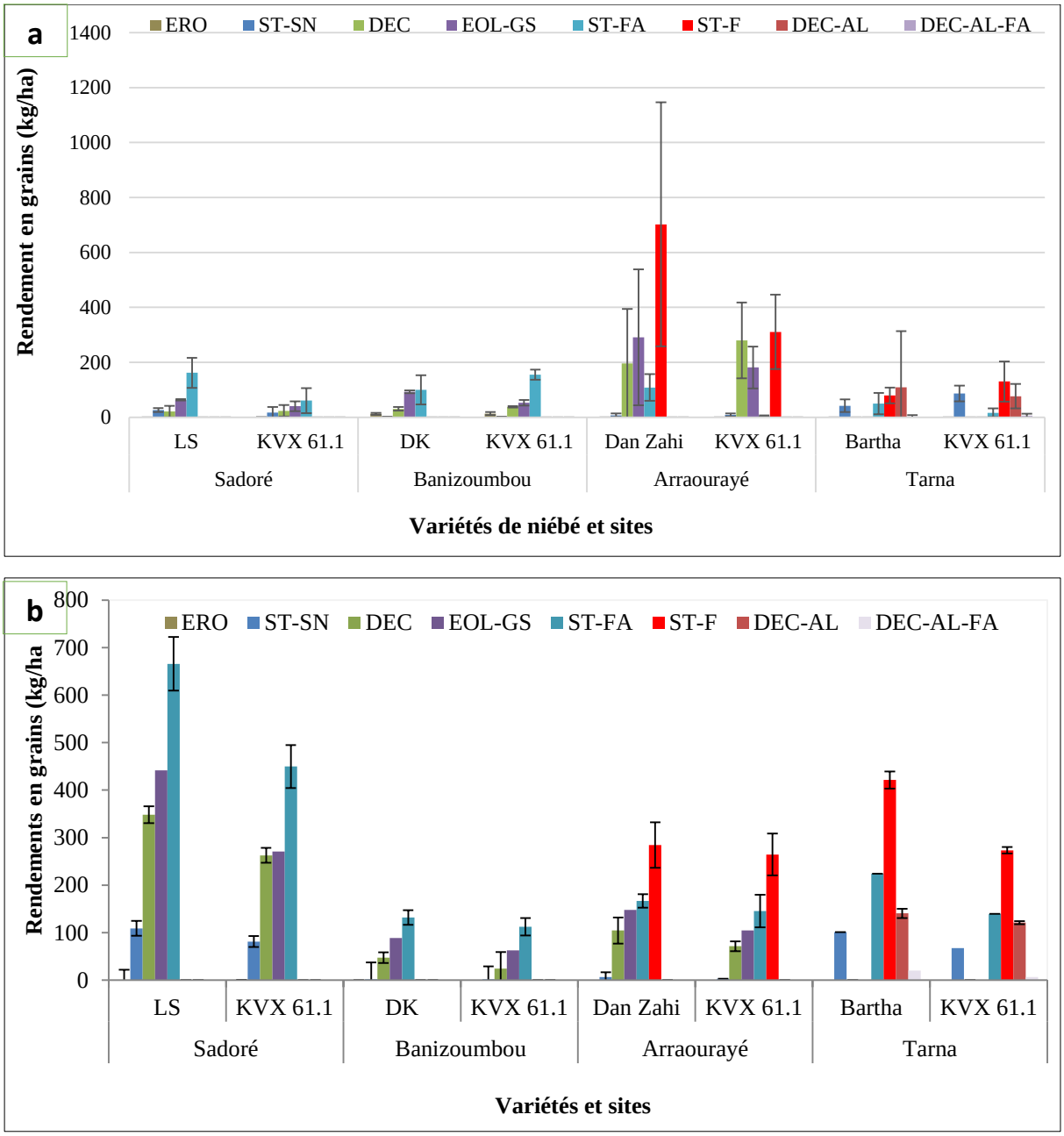


Figure 98: Comparaison des rendements en grains des variétés de niébé en fonction des sites et des EHS. (a) Durant l'année culturale 2015. (b) Durant l'année culturale en 2016.

On remarque une variabilité intra-EHS et interannuelle des rendements en grains des variétés de niébé entre les différents sites d'étude ($p < 0,0001$). L'analyse de cette figure permet de retenir que :

- Les EHS ST-SN des sites de Sadoré et Tarna présentent des rendements en grains relativement similaires et plus importants que ceux des sites de Banizoumbou et d'Arraourayé qui ont des rendements de même ordre de grandeur ;

- Sur l'EHS ERO, les rendements en grains des variétés de niébé sont toujours nuls aussi bien sur les sites de Sadoré que sur celui de Banizoumbou ;
- Sur l'EHS DEC, les rendements les plus élevés ont été enregistrés sur le site de Arraourayé durant la saison culturale 2015 et sur celui de Sadoré en 2016 ;
- Sur l'EHS EOL-GS, les rendements moyens en grains les plus importants sont observés à Arraourayé en 2015 et sur le site de Sadoré en 2016;
- Sur l'EHS ST-FA, les rendements moyens en grains sont plus importants sur les sites de Sadoré et Banizoumbou en 2015. Durant la saison culturale 2016, les faibles rendements ont été mesurés sur le site de Banizoumbou ;
- Sur l'EHS ST-F, les rendements moyens sont plus importants sur le site de Arraourayé durant la saison culturale 2015 et sur le site de Tarna en 2016.

7.4. Discussion

Les résultats de ce travail ont montré que la nodulation et la production de niébé sont deux aspects relatifs à la production du niébé, variable à l'intérieur des champs agricoles.

Le premier aspect est relatif l'influence significative de l'hétérogénéité de surface du sol sur la formation des nodules totaux et fonctionnels. Elle peut être liée à la variabilité des propriétés physico-chimiques et biologiques qu'induit l'hétérogénéité de surface du sol. Les travaux de Fening et Danso (2002), réalisés sur différents types de sol au Ghana, ont montré que la quantité des bactéries responsables de la nodulation chez le niébé varie en fonction du type de sol. Le taux de nodulation des différentes variétés de niébé suivi dans le cadre de cette étude est en général plus élrvés sur les entités SF-FA. Cette importante nodulation du niébé sur cette entité de surface peut-être liée à la nature de l'espèce (*Faidherbia albida*) qui caractérise cette EHS. Elle-même légumineuse, les sols sous cet arbre peuvent être potentiellement riches en souche indigène de *Rhizobium* ; bactérie responsable de la formation symbiotique des nodules avec les racines du niébé. Les plus faibles nodulation ont été obtenues par ordre décroissant sur les entités ERO et ST-SN des sols ferrugineux et DEC-AL et DEC-AL des sols alluviaux. L'hydromorphie temporaire et parfois sur des longues périodes sur les entités des sols alluviaux constitue un obstacle à la nodulation du niébé. Les travaux antérieurs de Minchin et Summerfield (1976) Goldsworthy et al. (1984) ont montré

cette contrainte de la nodulation vis-à-vis de l'hydromorphie. Sur les surfaces ERO, la forte acidité du sol et le manque de nutriments qui les caractérise constitue un facteur limitant de la formation des nodules chez le niébé. Miao et al. (2007) montrent l'acidité est un facteur limitant de la nodulation.

Le second aspect est relatif à la variabilité de la production en fanes et en grains de niébé. En effet, les travaux ont en effet relevé l'hétérogénéité de surface du sol entraine une variation des rendements du niébé à l'intérieur des champs agricoles. Ces travaux sont conformes à ceux obtenus par Gandah (1999), Brouwer (2008), Gandah et al., (2000, 2003a,b) qui ont montré la variabilité des rendements agricoles dans les champs de l'Ouest du Niger. Ils confirment la variabilité des rendements agricoles mise en évidence en zones sahélienne et soudanienne du Burkina Faso par Diarisso et al., (2016). Il ressort que les entités ST-FA et ST-F sont les plus productives en fanes et grains. Les rendements obtenus sur ces surfaces sont largement au-dessus ceux en milieu paysan au Niger. Cette hausse de rendements observées sur ces types EHS serait lié au microenvironnement qu'induit la présence de *Faidherbia albida* et des fourmilières. Ces entités sont considérées comme ilot de fertilité par les agriculteurs nigériens en raison de la concentration de nutriments sur ces surfaces (Seyni Bodo et al., 2019). Ensuite, les rendements des différents variétés de niébé sont plus importants sur les surfaces EOL-GS et DEC par rapport aux EHS ST-SN, ERO et DEC-AL-FA. Pour les entités EOL-GS, ces rendements s'expliquent par l'amélioration de la fertilité des sols induite par le piégeage de la matière occasionné par les touffes de Guiera senegalensis (Dan Lamso *et al*., 2015 a,b ; Wezel, 2002). Les faibles observés sur les entités ERO et ST-SN seraient liés à la pauvreté des sols sur ces entités et le développement de la croûte d'érosion constaté au cours de la saison culturale. Les surfaces DEC malgré leur richesse en nutriment, n'enregistrent pas les meilleurs rendements. En cause, leur hydromorphie temporaire et souvent sur des périodes relativement longues est une contrainte la croissance du niébé comme par Timsina et al. (1994 a,b).

7.5. Conclusion

Les résultats de cette étude montrent que l'hétérogénéité de surface du sol a un effet significatif sur la formation des nodosités et la productivité chez le niébé. Ils ont permis de hiérarchiser les types d'entités homogènes de surface du sol à travers la nodulation et la production de niébé. Il apparait que les entités de surface les plus productives en fanes et en niébé, les surfaces ST-FA et ST-F. Ces surfaces semblent aussi favoriser la formation des nodosités. En effet, les rendements sur ces entités dépassent les rendements moyens obtenus en milieu paysan au Niger. La formation des nodules est aussi plus importante sur ces entités que sur les autres EHS.

Sur les entités ERO, ST-SN et DEC-AL-FA, la nodulation et la production du niébé sont faibles à cause du manque de nutriment et l'acidité pour les deux premières et du dévéloppement anrchique des mauvaises herbes et de l'hydormorphie des sols pour la dernière entité. Ces entités sont les moins productives quelles que soient la variété et l'année.

La prise en compte de l'hétérogénéité de surface du sol dans les champs paysans devra permettre d'orienter les actions à mener pour l'amélioration de la qualité des sols et de la productivité du niébé.

Chapitre 8. Effets de l'application du fumier sur la qualité du sol et le potentiel de production du niébé sur les EHS à contraintes[3]

8.1. Introduction

Les entités homogènes de surface (EHS) identifiées dans les chapitres 4, 5, 6 et 7 de ce travail se répartissent en deux catégories :

- les EHS avec des contraintes édaphiques spécifiques qui sont peu ou pas productives vis-à-vis de la culture du niébé, notamment les surfaces de types ERO sur les sites de Banizoumbou et Sadoré, les surfaces de types ST-SN sur sols ferrugineux sur l'ensemble des sites et DEC-AL sur les alluvions de Goulbi de Maradi sur le site de Tarna;
- les EHS favorables à la culture du niébé, notamment les surfaces de type ST-FA, EOL-GS DEC et ST-F, DEC-AL-FA.

Les paysans adoptent un certain nombre de stratégies sur les surfaces les moins productives de leurs parcelles, parmi lesquelles l'application de fumures organiques apparaît être la principale stratégie. La fumure organique est constituée notamment de fumier, lui-même constitué principalement d'un mélange de terre, de litière et des déjections des animaux élevés dans les concessions encore appelé « poudrette de parc ». Hormis sur le site de Tarna, les quantités de fumier apportées dans les champs sont généralement faibles à cause de la pauvreté des ménages à disposer d'un grand nombre d'animaux et de la difficulté de transporter le fumier des maisons vers les champs.

Ce chapitre est axé sur l'évaluation de cette application pour améliorer la qualité du sol et la production du niébé sur les EHS à contraintes.

La première partie de ce chapitre portera sur l'impact de la fumure organique sur les caractéristiques hydriques et les propriétés chimiques des EHS à contraintes ayant reçu un amendement. La deuxième partie sera consacrée à l'impact de cette pratique sur la production du niébé. Nous présenterons dans ces parties des résultats comparatifs entre les

[3] En marge de cette partie, une pratique de gestion de la fertilité des sols constatée en zone peulh de Sadoré a été publiée dans EWASH and TI Journal. SEYNI BODO B, Ambouta J.M.K, Malam Issa O, Adamou Didier T, Morvan X, Conreux A, Marin B, Ponthieu M, Fronteau G. Effets de la mobilité périodique de l'habitat dans les champs cultivés sur la qualité physico-chimique des sols dans l'Ouest nigérien. Volume 3 Issues 1, Page 60-68

propriétés hydriques et physico-chimiques, les nombres de nodules fonctionnels et les rendements des EHS à contraintes ayant reçu un amendement et celles qui n'en ont pas reçues.

8.2. Matériel et méthodes

8.2.1. Caractéristiques de l'apport du fumier sur les sites

L'évaluation de l'effet de la fumure organique sur les EHS à contraintes a été conduite sur les quatre sites d'étude. Les EHS concernées sont de types ERO et ST-SN à Banizoumbou et Sadoré, ST-SN à Arraourayé, ST-SN et DEC-AL sur le site de Tarna. L'application du fumier sur ces différentes surfaces a été réalisée par les propriétaires des champs selon leurs pratiques culturales habituelles. Le fumier appliqué est en majorité constitué de fèces de bovins et caprins sur les sites de Tarna et de Sadoré, tandis qu'à Banizoumbou et Arraourayé, il est issu surtout des fèces des équidés (âne) et caprins (mouton et chèvre). Sur le site de Tarna, la fumure organique est accompagnée de cendres des débris de bois calcinés. Il est transporté au champ à l'aide d'une charrette à traction asine à Banizoumbou, Sadoré et Arraourayé et à traction bovine à Tarna. Les quantités appliquées sur les différentes EHS sont regroupées dans le tableau 53. Les quantités de fumier apportées sont généralement en petites quantités et elles varient entre 95 et 130 kg/ha sur des surfaces de 120 m². Sur le site de Tarna les producteurs retournent le sol après l'apport du fumier durant les travaux champêtres avant l'installation de la saison des pluies. En revanche, sur les autres sites, le fumier est déposé sur les surfaces sans labour avec la conséquence d'être transféré par le ruissellement au cours des premières pluies.

Tableau 53: Quantité de fumier apportée par EHS à contrainte sur l'ensemble des sites

Sites	Nombre de Charrettes	Quantité moyenne (kg)/par charrette	Quantité totale de fumier (kg)/120 m²
Banizoumbou	5	19	95
Sadoré	5	19,6	98
Arraourayé	4	18,5	74
Tarna	5	26	130

8.2.2. Parcelles de suivi de niébé

Les parcelles expérimentales des EHS ayant reçu de la fumure organique mesurent 120 m², elles ont été délimitées pendant les travaux de préparation des champs à l'approche de la saison des pluies sur chaque site. Nous avons demandé aux paysans d'apporter du fumier sur ces surfaces suivant leur manière d'application. Le dispositif pour la conduite des essais de niébé consiste au découpage de la surface de 120 m² en 12 parcelles élémentaires de 16m² (Figure 99). Les parcelles élémentaires sont indiquées aux paysans durant le semis. Le semis du niébé a été réalisé sur les surfaces délimitées selon les pratiques habituelles des paysans. Sur 6 des 12 parcelles élémentaires, du niébé local a été semé ; sur les 6 autres, la variété KVX61-1 a été semé.

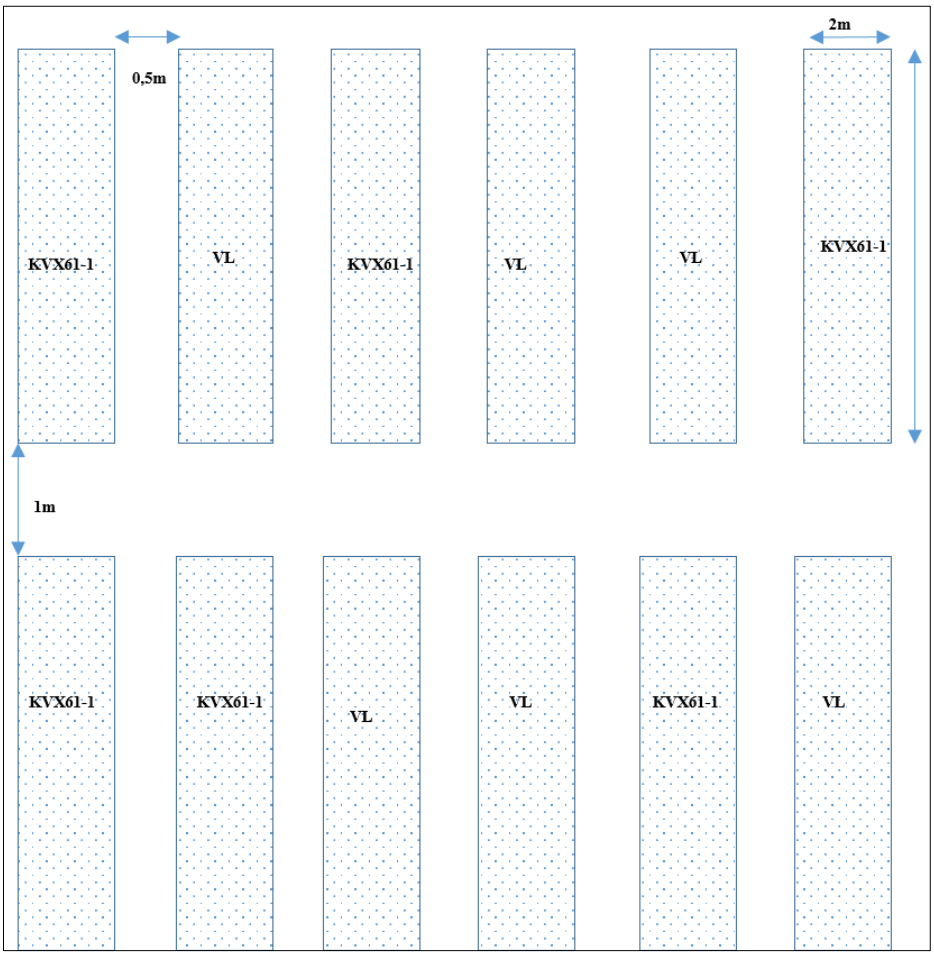


Figure 99: Dispositif de suivi de la production et de la nodulation des variétés de niébé KVX61-1 et VL sur les parcelles fumées durant la saison culturale 2016.

Les parcelles de types ERO, ST-SN, DEC-AL du chapitre 5 ont servi de parcelle « témoin », représentative des EHS à contraintes n'ayant pas reçu d'apport organique.

8.2.3. Analyses réalisées au laboratoire

Les analyses réalisées au laboratoire concernent la granulométrie, la mesure de la capacité de rétention en eau, les mesures de pH eau, de la teneur en N, P, C, des bases échangeables et la capacité d'échange cationique. Les protocoles d'analyses chimiques sont les mêmes que ceux décrits au chapitre 3. L'analyse granulométrique des échantillons collectés en 2016 a été réalisée à l'aide d'un granulométre laser de type Laser Mastersizer 2000.

Les analyses chimiques ont été réalisées sur 63 échantillons collectés en 2016 dans l'horizon 0-10 cm, à raison de 6 prélèvements sur les EHS à contrainte amendées avec de la fumure organique et 3 prélèvements sur les surfaces à contrainte non amendées (Tableau 54). Ces échantillons sont ensuite conditionnés et acheminés au laboratoire GEGENAA de l'Université de Reims Champagne Ardenne pour les analyses physiques et chimiques.

Tableau 54: Nombre d'échantillons collecté durant la saison de culture 2016

	Sites				
EHS	Banizoumbou	Sadoré	Araourayé	Tarna	Total
ST-SN	3	3	3	3	12
ERO	3	3	x	x	6
DEC-AL	x	0	x	3	3
ERO + fumier	6	6	x	x	12
ST-SN + fumier	6	6	6	6	24
DEC-AL + fumier	x	x	x	6	6
Total échantillon	18	18	9	18	63

Un seul site a fait l'objet de mesure de rétention eau, le site de Banizoumbou. Au total, 24 échantillons de sol de surface (0-5 cm de profondeur) ont été collectés : six échantillons par EHS à contrainte avec et sans l'amendement de fumure organique (Tableau 55). Les prélèvements se sont déroulés durant la saison culturale 2016. Ces échantillons ont été ensuite transférés au laboratoire GEGENAA pour les mesures de rétention en eau suivant le protocole présenté dans le chapitre 6.

Tableau 55: répartition des échantillons des sols pour la rétention en eau

EHS	ST-SN non fumée	ST-SN fumée	ERO non fumée	ERO fumée
Échantillons	6	6	6	6

8.1.4. Mesures réalisées sur le terrain

Les analyses réalisées sur le terrain regroupent la conductivité hydraulique à saturation(Ks), le dénombrement des nodules et la mesure des rendements en fanes et en grains.

Le protocole de mesure du Ks est identique à celui décrit dans le chapitre 6. Les mesures ont été réalisées sur 4 paires de cylindres installés le 13 juillet 2016 sur chaque EHS à contraintes amendées et non amendées du site de Banizoumbou.

Les mesures de la nodulation et des rendements en fanes et en grains du niébé ont été réalisées selon le protocole décrit dans le chapitre 7.

8.3. Résultats

8.3.1. Effet de l'apport de fumure organique sur les propriétés des EHS à contraintes sur les sites de Banizoumbou et de Sadoré (Tillabéri)

8.3.1.1. Caractéristiques physico-chimiques globales

Le tableau 56 présente la composition granulométrique des sols des entités à contrainte ayant ou pas reçu d'apports organiques. Les sols de deux types d'entités, ST-SN et ERO ayant ou pas reçu d'apport, montrent des textures identiques (sablo-limoneuse à Banizoumbou et sableuse à Sadoré). Néanmoins, l'analyse de variance révèle quelques différences entre les teneurs des différentes classes granulométriques :

- sur le site de Banizoumbou : les limons fins affichent une différence significative entre les surfaces ST-SN non fumées et ST-SN fumées (p = 0,03). Il n'y a aucune différence significative entre les teneurs de ces deux EHS en limons grossiers (p=0,16), sables fins (p=0,07) et sables grossiers (p=0,05). Entre les EHS de type ERO

non fumées et fumées, les argiles et les sables fins présentent des différences significatives (p= 0,02) et (p=0,005). Les teneurs en argiles et en sables fins sont plus importants sur les surfaces ERO fumées. Les teneurs en limons fins et grossiers et en sables grossiers sont similaires entre les deux entités (p= 0,05 ; 0,20 ; 0,06).

- sur le site de Sadoré : les teneurs en argiles sont significativement plus élevés sur les EHS de type ST-SN fumées comparativement aux ST-SN non fumées (p=0,02). Les teneurs en limons fins, limons grossiers, sables fins et sables grossiers sont dans le même ordre de grandeur entres les deux entités (p= 0,21 ; 0,29 ; 0,77 ; 0,64). Aucune différence significative n'est observée entre les teneurs en particules d'argiles, limons fins, limons grossiers, sables fins et sables grossiers des surfaces de type ERO non fumées et fumées (p= 0,40 ; 0,20 ; 0,18 ; 0,52).

Tableau 56: Composition granulométrique des entités de surface du sol fumées et non fuméées des sites de Banizoumbou et Sadoré.

	Banizoumbou				Sadoré			
	ERO non fumée	**ERO fumée**	**ST-SN non fumée**	**ST-SN fumée**	**ERO non fumée**	**ERO fumée**	**ST-SN non fumée**	**ST-SN fumée**
A (%)	4,8a	8,3b	1,1a	1,5a	2,8a	3,6a	0,9a	1,4b
LF (%)	10,5a	12,6a	4,8a	7,6b	5,2a	6,5a	2,8a	3,6a
LG (%)	5,4a	6,3a	3,9a	5,3a	2,7a	3,2a	1,7a	2,2a
SF (%)	53,1a	43,0b	36,6a	48,2a	42,7a	41,6a	37,9a	37,3a
SG (%)	26,3a	29,9a	53,4a	37,4a	46,6a	45,2a	56,7a	55,5a

Les chiffres suivis de la même lettre dans la même ligne et se rapportant aux même EHS fumées ou pas indiquent n'ont pas de différence significative au seuil de p = 0.05 . ***A*** *: Argile;* ***LF****: Limon fin;* ***LG****: Limon grossier;* ***SF*** *: Sable fin;* ***SG*** *: Sable grossier.*

Les paramètres chimiques caractéristiques des EHS à contrainte ayant ou pas reçu un apport organique sont présentés dans le tableau 57. L'application de fumier sur les EHS ERO et ST-SN des deux sites se traduit par une modification significative (p < 0,05) des propriétés chimiques.

- sur le site de Banizoumbou, l'apport du fumier a permis de réduire significativement l'acidité observé sur ST-SN (p< 0,0001 ; p=0,000) et ERO (p= 0,000 ; 0,001). Sur les deux sites, on passe d'un pH moyennement acide (compris entre 5,6 et 6) sur l'EHS ST-SN non fumée à pH neutre (compris entre 6,6-7,3) sur l'EHS de type ST-SN fumée. Sur l'EHS de type ERO, le pH est très fortement acide (compris entre 4,5-5) sur ERO

non fumée, alors qu'il est faiblement acide (compris entre 6,1-6,5) sur l'EHS de type ERO fumée ;

- les taux de carbone total ont significativement augmenté consécutivement à l'apport de la fumure organique sur les EHS de type ST-SN (p=0,002 ; 0,000) et ERO (p=0,005 ; 0,000) des deux sites. Les teneurs en carbone sur les entités ayant reçu un apport organique (5-7 g/kg) représentent le triple de celles des EHS n'ayant pas reçu d'apport organique (2 g/kg).
- Les teneurs en azote s'améliore de façon significative sur les deux sites avec l'apport de fumure organique sur les entités homogènes de surface de types ST-SN (p=0,003 ; 0,002) et ERO (p=0,001 pour les deux sites). Sur le site de Banizoumbou, les teneurs en azote mesurées sur les EHS de type ERO sont comprises entre 0,2 g/kg sur les surfaces non amendées à 0,6 g/kg sur les surfaces ERO ayant reçues un apport de fumure organique. Les valeurs mesurées sur les EHS de type ST-SN ayant reçu de la fumure organique sont 8 fois plus élevées que celles obtenues sur les surfaces ST-SN non amendées. A Sadoré, les teneurs en azote des surfaces ERO non fumée sont de 0,2 g/kg contre 0,3 g/kg sur les surfaces ERO fumée. Les valeurs mesurées sur les surfaces ST-SN sont de 0,1 g/kg en l'absence de fumure organique et 0,3 g/kg avec l'apport de fumure.
- les teneurs en phosphore ont significativement augmenté sur les entités de type ERO (p=0,001 ; p< 0,0001) et ST-SN (p=0,000 ; 0,004) ayant reçu du fumier. Sur les deux sites, les teneurs en phosphore sont inférieures à 10 mg/kg sur les EHS de types ERO et ST-SN non fumées. Elles passent, respectivement, à 20 mg/kg sur l'EHS de type ERO fumée et à 50 mg/kg sur l'EHS de type ST-SN fumée sur le site de Banizoumbou. A Sadoré, les teneurs en phosphore passent à 20 mg/kg sur les EHS ERO et ST-SN fumées ;
- la somme des bases échangeables (S), affichent une différence significative sur les deux sites entre ERO non fumée et ERO fumée (p< 0,0001 sur les sites) et entre ST-SN non fumée et ST-SN fumée (p< 0,0001). La somme des bases échangeables passe de 0,3 Cmol(+).kg-1 sur ERO non fumée à 2,2 Cmol(+).kg-1 sur ERO fumée et de 0,5 Cmol(+).kg-1 sur ST-SN non fumée à 2,1 Cmol(+).kg-1 sur ST-SN fumée sur le site de Banizoumbou. A Sadoré, elles varient de 0,9 Cmol(+).kg-1 sur ERO non fumée à 2,1

sur ERO fumée et de 0,5 Cmol(+).kg-1 sur ST-SN non fumée à 1,9 Cmol(+).kg-1 sur ST-SN fumée. Sur les deux sites, le cortège ionique est dominé par les ions Ca^{2+};

- la capacité d'échange cationique (CEC) affiche une différence significative sur les deux sites entre ERO non fumée et ERO fumée (p< 0,0001 sur les sites) et entre ST-SN non fumée et ST-SN fumée (p< 0,0001 sur les sites). Cependant, la CEC reste toujours à un niveau très bas (< 6 Cmol(+).kg-1). Sur le site de Banizoumbou, elle est de 0,9 Cmol(+).kg-1 sur les surfaces ERO non fumées à 2,7 Cmol(+).kg-1 sur les surfaces ERO fumées et 0,6 Cmol(+).kg-1 sur le EHS ST-SN non fumées à 2,7 Cmol(+).kg-1 sur les EHS ST-SN fumées. A Sadoré, elle varie de 0,9 Cmol(+).kg-1) sur les surfaces ERO non fumées à 2,1 Cmol(+).kg-1) sur les surfaces ERO fumées et de 0,5 à 1,9 Cmol(+).kg-1) sur les EHS ST-SN fumées.

Tableau 57: Propriétés chimiques des entités de surface du sol à contrainte ayant reçu ou non de la fumure organique sur les sites de Banizoumbou et Sadoré.

	Banizoumbou				Sadoré			
	ERO non fumée	**ERO fumée**	**ST-SN non fumée**	**ST-SN fumée**	**ERO non fumée**	**ERO fumée**	**ST-SN non fumée**	**ST-SN fumée**
pHeau	4,8a	6,4b	5,7	7,0	4,9a	6,1b	5,7a	6,6b
C (g/kg)	2a	6b	2a	7b	2a	5b	2a	6b
N (g/kg)	0,2b	0,5b	0,1a	0,8b	0,2a	0,3b	0,1a	0,3b
C/N	11,4a	11,0b	14,9a	8,6b	13,00a	14,4a	12,3a	19,8b
P (g/kg)	<10a	20,0b	<10a	50,0b	0,0	20,0	0,0a	20,0b
Ca Cmol(+).kg-1	0,2a	1,5b	0,3a	1,3b	0,2a	1,0b	0,3b	1,0b
K (Cmol(+).kg-1)	0,04a	0,16b	0,04a	0,23b	0,04a	0,13b	0,03a	0,17
Mg (Cmol(+).kg-1)	0,08a	0,49b	0,13a	0,49b	0,1a	0,6b	0,1a	0,6b
Na (Cmol(+).kg-1)	0,0a	0,01b	0,0a	0,04b	0,0a	0,0a	0,0a	0,01b
S (Cmol(+).kg-1)	0,3a	2,2b	0,5a	2,1b	0,4a	1,8b	0,5a	1,8b
CEC (Cmol(+).kg-1)	0,9a	2,7b	0,6a	2,7b	0,9a	2,1b	0,5a	1,9b

Les chiffres suivis de la même lettre dans la même ligne et pour les mêmes types d'EHS ne sont pas significativement différents au seuil de p = 0.05.

8.3.1.2. Capacité de rétention en eau

La figure 100 illustre l'effet de l'apport en fumure organique sur les teneurs en eau à la capacité au champ et au point de flétrissement permanent. Les teneurs en eau à la capacité au champ (pF2) et au point de flétrissement permanent pF4.2) sont significativement différentes entre les entités ERO et ST-SN fumées et celles non fumées (p<0,0001). La teneur en eau à la capacité au champ sur ERO non fumée est de 6,8, elle passe à 10,1 % sur les entités ERO fumées. Les valeurs obtenues sur les entités ST-SN non fumées et fumées sont, respectivement de 4,1 et 7,1 %. La teneur en eau au point de flétrissement permanent varie entre 2,1 % sur ERO non fumée à 2,8 % sur ERO fumée et de 0,9 % sur ST-SN non fumée à 1,6 % sur ST-SN fumée.

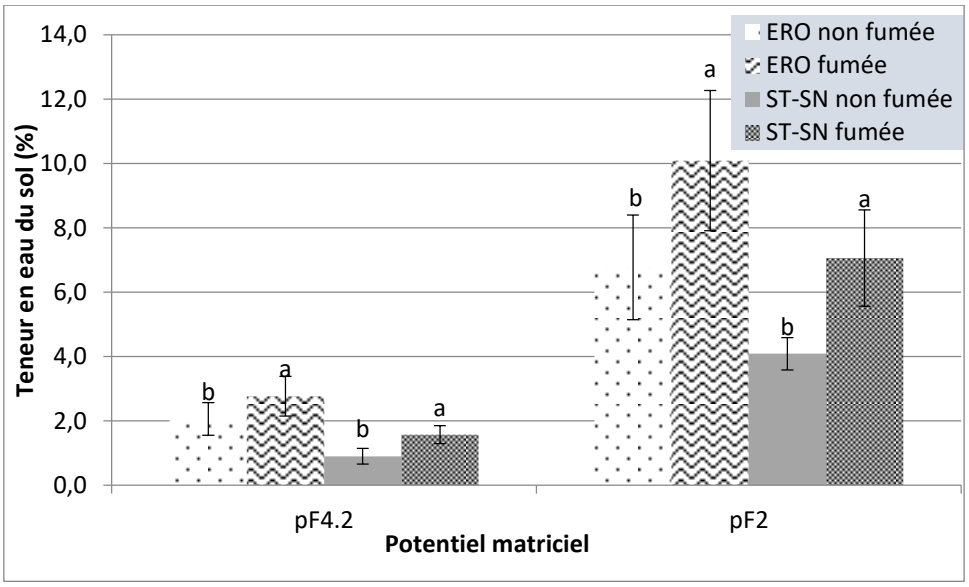


Figure 100: effet de la fumure organique sur la rétention en eau

La figure 101 regroupe les valeurs de la réserve en eau utile mesurées sur les entités ERO et ST-SN ayant reçu ou non un apport de fumure organique. L'analyse de variance indique des différences significatives entre la réserve en eau mesurées sur les surfaces ERO et ST-SN fumées et non fumées (p=0,000) et (p=0,001) en lien avec l'apport de la fumure organique (Tableau 58). Cette réserve est toujours plus importante au niveau des surfaces amendées (5,9 mm sur ERO et 4 mm sur ST-SN fumées) comparées à celles qui n'ont pas

reçues d'amendement organique (3,5 mm sur ERO non fumée et de 2,5 mm sur ST-SN non fumée).

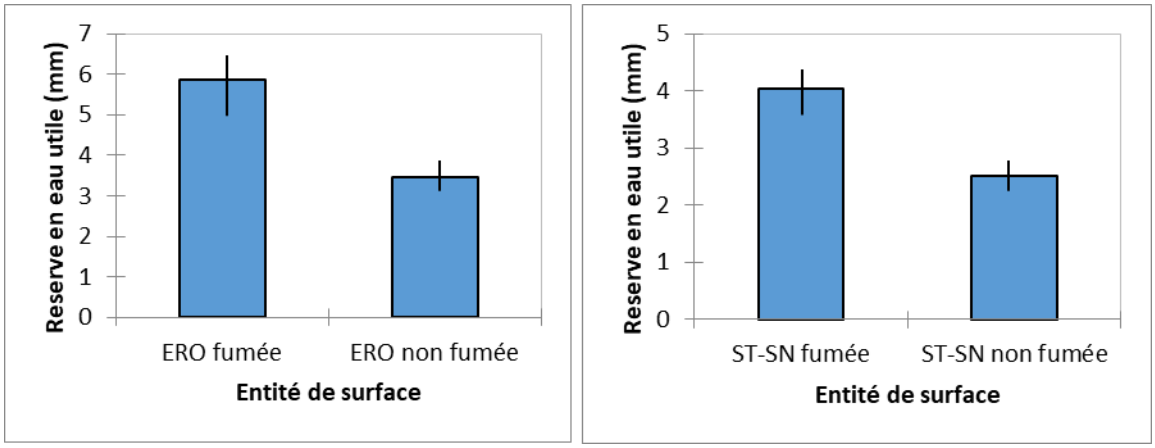


Figure 101: Effet de la fumure organique sur la réserve en eau utile

Tableau 58: Analyse de variance entre la réserve en eau utile des EHS à contraintes fumées et non fumées.

		Entre ERO non fumée et ERO fumée			
Source	DDL	Somme des carrés	Moyenne des carrés	F	Pr > F
Modèle	1	58,582	58,582	17,876	**0,000**
Erreur	39	127,806	3,277		
Total corrigé	40	186,388			
		Entre ST-SN non fumée et ST-SN fumée			
Modèle	1	13,710	13,710	13,620	**0,001**
Erreur	22	22,144	1,007		
Total corrigé	23	35,854			

8.3.1.3. Conductivité hydraulique à saturation (Ks)

La figure 102 regroupe les valeurs de Ks mesurées sur les EHS ERO et ST-SN non fumées et ERO et ST-SN fumées. L'analyse de variance révèle des différences significatives entre le Ks des EHS ERO non fumée et ERO fume (p<0,0001) et le Ks des EHS ST-SN non fumée et ST-SN fumée (p=0,000 ; Tableau 59). Les valeurs varient de 5 mm/h sur ERO non fumée à 23 mm/h sur ERO fumée et de 32 mm/h sur ST-ST-SN non fumée à 46 mm/h sur ST-SN fumée.

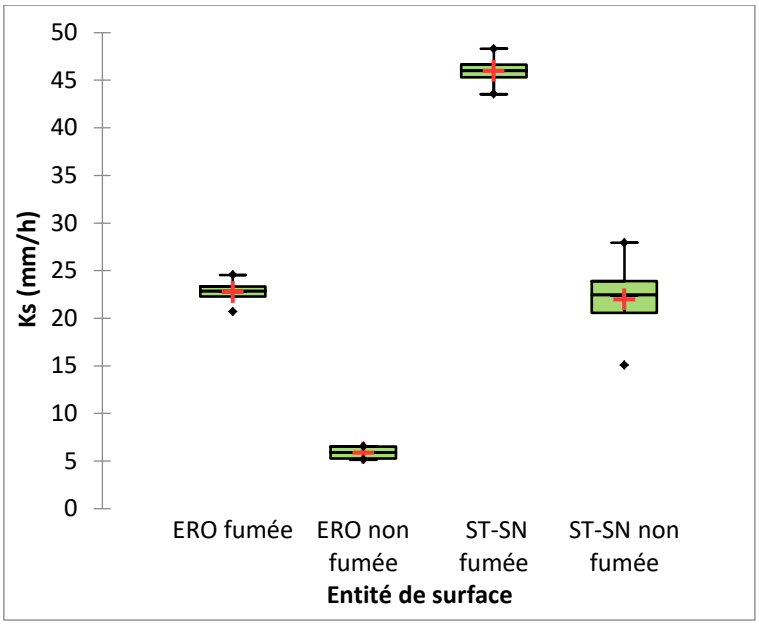


Figure 102: Effet de la fumure organique sur la conductivité hydraulique à saturation des EHS à contrainte fumée et non fumée.

Tableau 59: Analyse de variance de la conductivité hydraulique entre EHS à contrainte fumée et non fumée

		Entre ERO non fumée et ERO fumée			
Source	DDL	Somme des carrés	Moyenne des carrés	F	Pr > F
Modèle	1	568,853	568,853	373,487	**< 0,0001**
Erreur	6	9,139	1,523		
Total corrigé	7	577,992			
		Entre ST-SN non fumée et ST-SN fumée			
Modèle	1	1149,709	1149,709	72,821	**0,000**
Erreur	6	94,728	15,788		
Total corrigé	7	1244,438			

8.3.2. Effet de l'application du fumier sur les EHS à contraintes sur les sites de Arraourayé et Tarna

Le tableau 60 présente la composition granulométrique des sols sur les EHS à contrainte ayant et pas reçues de fumier sur les sites d'Arraourayé et de Tarna. Les sols des entités ST-SN ayant fumées et non fumées ont des textures identiques, sableuse sur ST-SN non fumée et ST-SN fumée à Arraourayé et sablo-limoneuse à Tarna. Les entités DEC-AL non fumée et DEC-fumée sur le site de Tarna présentent la même texture limoneuse.

Tableau 60: Composition granulométrique des entités de surface du sol à contrainte ayant ou pas reçues d'apport organique sur les sites de Arraourayé et Tarna (Maradi)

	Arraourayé		Tarna			
	ST-SN non fumée	ST-SN fumée	ST-SN non fumée	ST-SN fumée	DEC-AL non fumée	DEC-AL fumée
A (%)	0,8a	1,0a	1,1a	1,3a	3,2a	3,2a
LF (%)	4,2a	5,6a	5,3a	8,0a	19,9a	20,6b
LG (%)	2,8a	3,6a	3,9a	5,9a	15,7a	15,8a
SF (%)	29,2a	30,4a	36,6a	31,8a	49,9a	49,4a
SG (%)	63,1a	59,5a	53,0a	53,1a	12,0a	11,6a

Les paramètres chimiques des sols mesurés sur EHS à contraintes sur les sites de Arraourayé et de Tarna sont consignés dans le tableau 61. L'application du fumier sur les EHS ERO et ST-SN a une influence significative ($p < 0,05$) sur les propriétés chimiques des sols sur les deux sites.

- Les valeurs de pH mesurées sur les EHS de type ST-SN du site de Arraourayé varient entre 6,7 (neutre) sur les surfaces non fumées et 7,8 (légèrement alcalin) sur les surfaces fumées. Celles obtenues sur les EHS de type ST-SN du site de Tarna varient de 6,4 (faiblement acide) sur les surfaces non fumées à 8 (moyennement alcalin) sur les surfaces fumées. Aucune différence n'est observée entre le pH des entités DEC-AL non fumée et DEC-AL fumée des sols alluviaux de Goulbi;
- les taux de carbone mesurés sur les deux sites montrent des différences significatives entre les entités ST-SN fumées et non fumées ($p < 0,0001$; 0,005). Les valeurs mesurées sur le site de Arraourayé et de Tarna sont, respectivement de 1 g/kg et 2 g/kg sur ST-SN non fumée et 3 g/kg et 4 g/kg sur ST-SN fumée. l'apport du fumier a eu une influence significative ($p < 0,0001$) sur le taux de carbone mesuré sur les sols alluviaux de Goulbi. Il engendre des différences significatives entre les entités de type DEC-AL non fumé (5 g/kg) et fumé (8 g/kg) ;
- Les teneurs en azote mesurées sur les deux sites montrent des différences significatives entre ST-SN non fumée et ST-SN fumée ($p=0,001$; 0,01). Les valeurs obtenues sur le site de Arraourayé varient de 0,1 g/kg sur ST-SN non fumée à 0,3 g/kg sur ST-SN fumée. Sur le site Tarna, elles varient de 0,2 g/kg sur ST-SN non fumée 0,5 g/kg sur ST-SN fumée. Sur les sols alluviaux du Goulbi, les valeurs mesurées sur les

surfaces DEC-AL non fumées (0,5 g/kg) sont significativement inférieures ($p < 0,0001$) à celles obtenues sur les surfaces DEC-AL fumées (0,7 g/kg).

- les teneurs en phosphore mesurées sur les deux sites montrent des différences significatives entre ST-SN non fumée et ST-SN fumée ($p < 0,0001$ sur tous les sites). Alors que les teneurs en phosphore sur les surfaces ST-SN non fumées sont inférieures à 10 mg/kg, celles mesurées sur les surfaces ST-SN fumées sont de 30 mg/kg sur le site de Arraourayé et 110 mg/kg sur le site de Tarna. les teneurs en phosphore mesurées sur les sols alluviaux de Goulbi sont de 22 mg/kg sur les surfaces DEC-AL non fumées et 70 mg/kg sur les surfaces DEC-AL fumées ;
- Les teneurs en bases échangeables sur les deux sites sont significativement différentes ($p= 0,049$; 0,001) entre ST-SN et DEC-AL non fumées et ST-SN et DEC-AL fumées. Elles varient de 0,8 à 2,3 Cmol(+).kg-1) à Arraourayé et de 1 à 5,4 Cmol(+).kg-1) à Tarna. Les teneurs en bases échangeables mesurées sur les sols alluviaux de Goulbi sont de 4,9 Cmol(+).kg-1 sur les surfaces DEC-AL non fumées et 7,5 Cmol(+).kg-1 sur les surfaces DEC-AL fumées.
- La capacité d'échange cationique (CEC) a été aussi significativement influencée par l'apport du fumier entre ST-SN non fumée et ST-SN fumée ($p < 0,0001$ sur tous les sites). Sur le site de Arraourayé, elle varie de 0,9 Cmol(+).kg-1 sans apport de fumier à 2,4 Cmol(+).kg-1 avec apport. Sur le site de à Tarna, elle varie de 1,1 Cmol(+).kg-1 sur les surfaces fumées à 5,5 Cmol(+).kg-1 sur les surfaces non fumées. Sur les sols alluviaux de Goulbi, elle passe de 5,1 7,7 Cmol(+).kg-1 sur les surfaces DEC-AL non fumées à 7,7 Cmol(+).kg-1 sur les surfaces DEC-AL fumées.

-

Tableau 61: Effet de la fumure organique sur les propriétés chimiques des entités de surface du sol à contrainte et les entités sans contraintes sur les sites de Arraourayé et Tarna

	Arraourayé		Tarna			
	ST-SN non fumée	ST-SN fumée	ST-SN non fumée	ST-SN fumée	DEC-AL avant apport	DEC-AL fumée
pH eau	6,7a	7,8b	6,5a	8b	6,6a	6,8a
C (g/kg)	1a	3b	2a	4b	5a	8b
N (g/kg)	0,1a	0,3b	0,2a	0,5b	0, 5a	0,7b
C/N	11,7a	10,3a	9,5a	7,8a	11,2a	10,7a
P (g/kg)	<10a	30,0b	<10a	110b	22a	70b
Ca Cmol(+).kg-1	0,5a	1,5b	0,7a	3,8b	3,7a	5,5b
K (Cmol(+).kg-1)	0,1a	0,2b	0,08a	0,48b	0,4a	0,7b
Mg (Cmol(+).kg-1)	0,2a	0,5b	0,2a	1,0b	0,9a	1,4b
Na (Cmol(+).kg-1)	0,0a	0,0a	0,00a	0,03b	0,01a	0,03b
S (Cmol(+).kg-1)	0,8a	2,3b	1a	5,4b	4,9a	7,5b
CEC (Cmol(+).kg-1)	0,9a	2,4b	1,1a	5,6b	5,1a	7,7b

Les chiffres suivis de la même lettre, dans la même ligne et se rapportant à une même entité (fumée et non fumée) ne sont pas significativement différents au seuil de p = 0.05.

8.3.3. Influence du fumier sur la nodulation et la production du niébé

8.3.3.1. Site de Banizoumbou

8.3.3.1.1. Formation des nodules

Le tableau 62 présente le nombre de nodules totaux et fonctionnels des variétés DK et KVX 61.1 cultivées sur les EHS de type ERO et ST-SN fumées et non fumées. Le développement des nodules totaux et fonctionnels sur les deux variétés a augmenté significativement avec l'apport du fumier (p< 0,0001). Sur les surfaces ERO fumées, on dénombre 118 nodules totaux/plant et 108 nodules fonctionnels/plant pour la variété DK et 147 nodules totaux et 136 nodules fonctionnels/plant pour la KVX 61.1. Ces valeurs sont nulles sur les surfaces ERO non fumées quelle que soit la variété. Sur les surfaces ST-SN non fumées, 11 nodules totaux et 8 nodules fonctionnels/plant pour la variété DK et 15 nodules totaux et 12 nodules fonctionnels par plant de la variété KVX 61.1 ont été comptabilisés. Les

valeurs obtenues sur les surfaces ST-SN fumées sont de 127 nodules totaux et 113 nodules fonctionnels par plant de la variété DK et 140 nodules totaux et 130 nodules fonctionnels par plant de la variété KVX 61.1.

Tableau 62: Résultat du test de comparaisons multiples des moyennes des nodules de niébé formés par variété sur les EHS à contraintes avec et sans fumier à Banizoumbou.

	Nombre de nodules totaux (nodules/plant)				
	ERO non fumée	ERO fumée	ST-SN non fumée	ST-SN fumée	P
LS	0a	118b	11c	127b	< 0,0001
KVX 61.1	0a	147b	15c	140b	< 0,0001
Nombre de nodules fonctionnels (nodules/plant)					
LS	0a	108b	8c	113b	< 0,0001
KVX 61.1	0a	136b	12c	130b	< 0,0001

Les chiffres suivis de la même lettre, dans la même ligne et se rapportant à une même entité (fumée et non fumée) ne sont pas significativement différents au seuil de p = 0.05.

8.3.3.1.2. *Rendement en fanes et en grains en fonction des EHS*

La figure 103 illustre le rendement en fanes des variétés DK et KVX 61.1 cultivées sur des entités fumées et non fumée à Banizoumbou. L'analyse de variance montre une différence significative (p< 0,0001) entre les rendements en fanes des différentes surfaces. Les rendements en fanes sont passés de 0 kg/ha pour DK et KVX 61.1 sur ERO non fumée à 597 kg/ha pour la variété DK et 541 kg/ha pour la variété KVX 61.1 sur ERO fumée. Les rendements mesurés sur les entités de type ST-SN non fumées et sur les entités ST-SN fumées sont, respectivement de 8 kg/ha pour la variété DK et 5 kg/ha pour la variété KVX 61.1 et, 878 kg/ha pour la variété DK et 616 kg/ha pour la variété KVX 61.1. Les surfaces d'apport de fumier affichent des rendements nettement plus importants que ceux obtenus dans les champs paysans du Niger qui est de 400 kg/ha (Yoka et al., 2014).

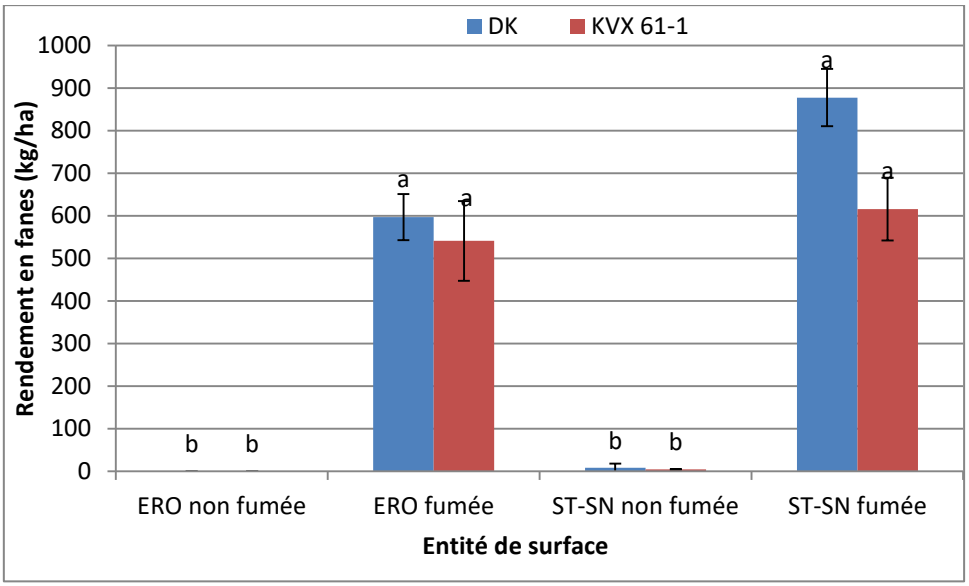


Figure 103: Rendement en fanes des variétés DK et KVX 61.1 sur les entités ERO et ST-SN avec ou sans apport de fumier du site de Banizoumbou

Les histogrammes présentant la même lettre pour chaque entité fumée et non fumée ligne ne sont pas significativement différents au seuil de p = 0.05 pour une même entité fumée ou non

La figure 104 illustre le rendement en grains des variétés DK et KVX 61.1 sur les entités ERO et ST-SN avec ou sans apport de fumier. L'analyse de variance réalisée sur les données montre une différence significative du rendement entre ces entités de surfaces (< 0,0001). Les rendements sont passés de 0 kg/ha pour les variétés DK et KVX 61.1 sur ERO non fumée à respectivement 240 kg/ha et 163 kg/ha sur ERO fumée. De même, ils sont passés de 2 kg/ha pour les variétés DK et KVX 61.1 sur ST-SN non fumée à respectivement 285 kg/ha et 201 kg/ha sur les surfaces ST-SN fumée.

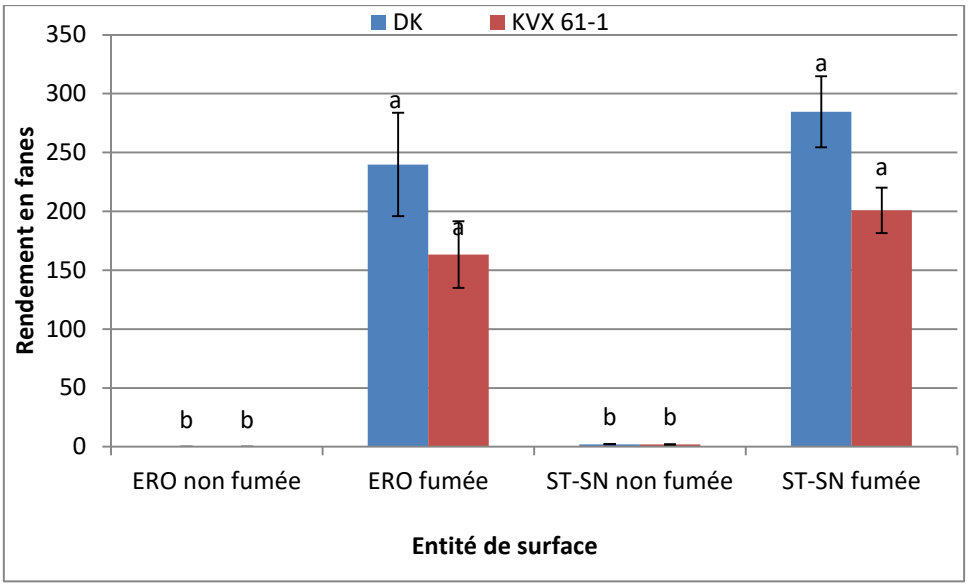


Figure 104: Rendement en grains de DK et KVX 61.1 en fonction des entités d'apport de fumier et les EHS à Banizoumbou*Les histogrammes présentant la même lettre pour chaque entité fumée et non fumée ligne ne sont pas significativement différents au seuil de p = 0.05 pour une même entité fumée ou non*

8.3.3.2. Site de Sadoré

8.3.3.2.1. Formation des nodules

Le tableau 63 présente le nombre de nodules totaux et fonctionnels des variétés LS et KVX 61.1 cultivées sur les EHS de types ERO et ST-SN fumées et non fumées sur le site de Sadoré. La formation des nodules sur les deux variétés de niébé cultivées sur des EHS ERO fumée et non fumée montre des différences significatives (< 0,0001). Le nombre de nodules formés varie de 1 nodule par plant de la variété LS et 7 nodules par plant de la variété KVX 61.1 sur les surfaces de type ERO non fumée à 151 nodules totaux/plant pour la variété LS et 230 nodules totaux/plant pour la variété KVX 61.1 sur les surfaces de type ERO fumées. Sur l'EHS ST-SN, on comptabilise 15 nodules totaux et 13 nodules fonctionnels/plant pour la variété LS et 20 nodules totaux et 16 nodules fonctionnels/plant pour la variété KVX 61.1 sur les parcelles non fumée, à 160 nodules totaux et 150 nodules fonctionnels/plant pour la variété LS et 148 nodules totaux et 141 nodules fonctionnels/plant pour la variété KVX 61-1 sur les parcelles fumées.

Tableau 63: Nombres de nodules totaux et fonctionnels mesurés sur les variétés LS et KVX 61.1 cultivées sur les parcelles fumées et non fumées à Sadoré.

	Nombre de nodules totaux (nodules/plant)				
	ERO non fumée	ERO fumée	ST-SN non fumée	ST-SN fumée	P
LS	1a	151b	15c	160b	< 0,0001
KVX 61.1	7a	230b	20c	148d	< 0,0001
	Nombre de nodules fonctionnels (nodules/plant)				
LS	1a	144b	13a	150b	< 0,0001
KVX 61.1	6a	220b	16c	141d	< 0,0001

Les chiffres suivis de la même lettre, dans la même ligne et pour une même entité (fumée et non fumée) ne sont pas significativement différents au seuil de p = 0.05

8.3.3.2.2. Rendement en fanes et en grains en fonction des EHS

La figure 105 présente les rendements en fanes des variétés LS et KVX 61.1 cultivées sur les entités ERO et ST-SN fumées et non fumées à Sadoré. Les différences observées entre les différentes entités de surface sont significatives (p < 0,0001) et révèlent l'influence de l'apport du fumier sur les rendements en fanes. On passe de rendements nuls, sur les surfaces ERO non fumées, et faibles, sur les surfaces ST-SN non fumées (311 kg/ha pour LS et 209 kg/ha pour la KVX 61.1), à des rendements très élevées sur les surfaces ERO fumées (2290 kg/ha pour la LS et 1570 kg/ha pour la KVX 61.1) et ST-SN fumées (2562 kg/ha pour la LS et 1657 kg/ha pour la KVX 61.1). La figure 106 montre le développement du niébé sur les EHS ERO fumée et non fumée. Les rendements sur ces surfaces sont au-dessus de ceux obtenus en milieu paysans au Niger (400 kg/ha).

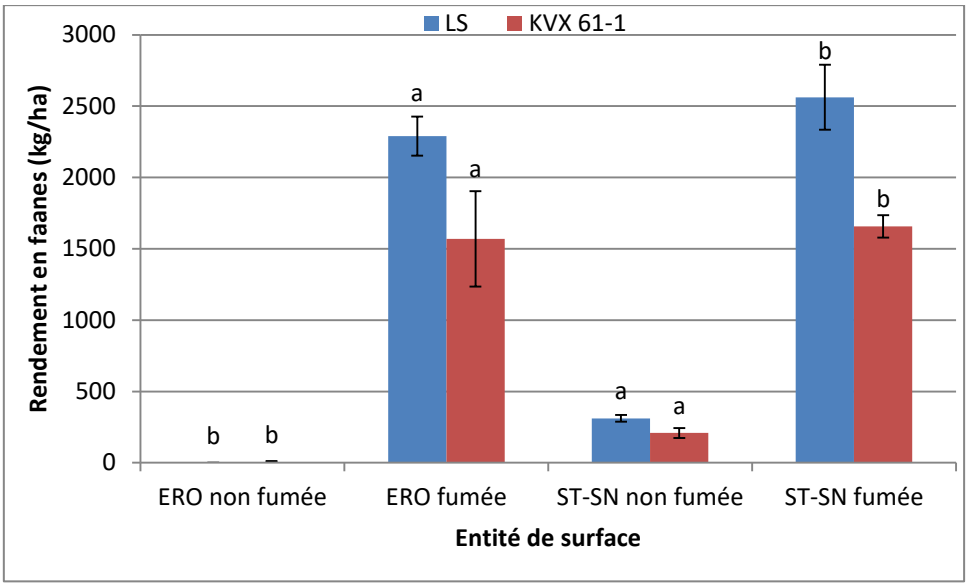


Figure 105: Effet du fumier sur le rendement en fanes de LS et KVX 61.1 des entités d'apport de fumier et les EHS Sadoré

Les histogrammes présentant la même lettre pour chaque entité fumée et non fumée ligne ne sont pas significativement différents au seuil de p = 0.05 pour une même entité fumée ou non

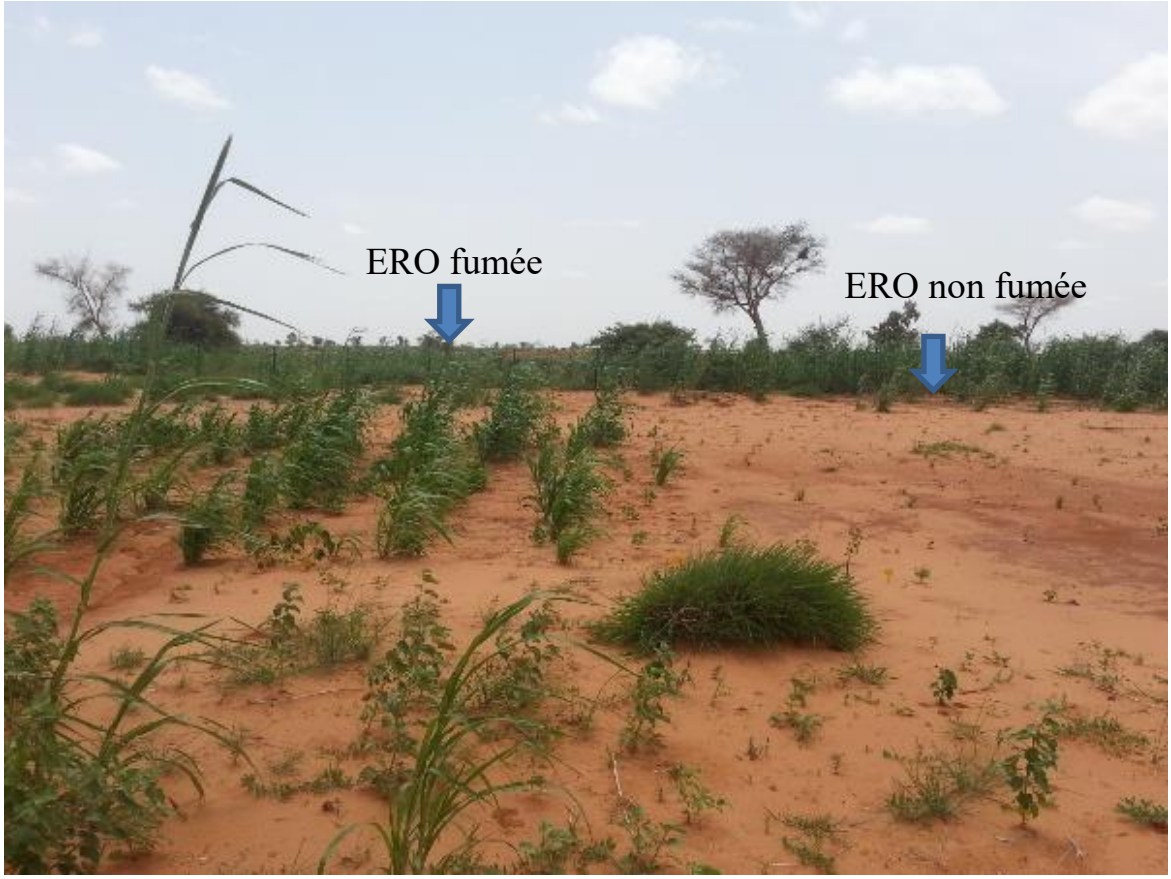


Figure 106: Croissance du niébé en association avec le mil en début de ramification en association avec le mil sur ERO et ERO + Fumier

La figure 107 présente le rendement en grains des variétés LS et KVX 61.1 sur les surfaces de types ERO et ST-SN fumées et non fumées à Sadoré. Il y a une différence significative entre les rendements en grains des différentes surfaces (p < 0,0001). Les rendements en grains les plus élevés sont enregistrés au niveau des surfaces ERO et ST-SN avec apport de fumier quelle que soit la variété de niébé : les rendements sur ces surfaces sont respectivement de 833 kg/ha pour la variété LS et 667 kg/ha pour la variété KVX 61.1 et 948 kg/ha pour la variété LS et 805 kg/ha pour la variété KVX 61.1. Les rendements mesurés sur les surfaces ERO non fumée sont nuls. Ceux obtenus sur ST-SN non fumée sont de 109 kg/ha pour la variété LS et 81 kg/ha pour la variété KVX 61.1. Ces surfaces présentent un rendement plus élevé que ceux de ceux obtenus en milieu paysan au Niger (120 kg/ha).

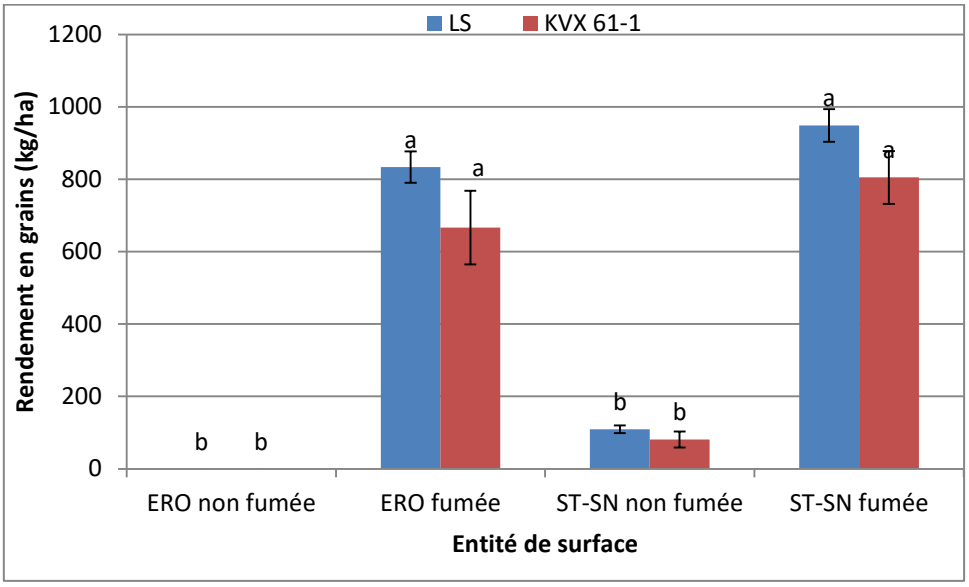


Figure 107: Rendement en grains des variétés LS et KVX 61.1 cultivées sur les entités ST et ERO avec apport ou sans apport de fumier à Sadoré. ***Les histogrammes présentant la même lettre pour chaque entité fumée et non fumée ne sont pas significativement différents au seuil de p = 0.05.***

8.3.3.3. Site de Arraourayé

8.3.3.3.1. Formation des nodules

Le tableau 64 illustre le nombre de nodules totaux et fonctionnels des variétés Dan Zahi et KVX 61.1 obtenus sur les surfaces de type ST-SN non fumées et fumées sur le site d'Arraourayé. L'apport du fumier entraine de façon significative (p<0,0001) une meilleure nodulation sur les deux variétés de niébé. Le nombre de nodules formés varie de 14 nodules totaux et 12 nodules fonctionnels/plant pour la variété Dan Zahi et 10 nodules totaux et 7

nodules fonctionnels pour la variété KVX 61.1 sur ST-SN non fumée à 78 nodules totaux et 66 nodules fonctionnels pour la variété Dan Zahi et 109 nodules totaux et 102 nodules fonctionnels/plant pour la KVX 61.1 sur ST-SN fumée.

Tableau 64: Nombres de nodules totaux et fonctionnels mesurés sur les variétés Dan Zahi et KVX 61.1 cultivées sur les parcelles fumées et non fumées à Arraourayé

	Nombre de nodules totaux (nodules/plant)		
	ST-SN	ST-SN + Fumier	p
Dan Zahi	14a	78b	< 0,0001
KVX 61.1	10a	109b	< 0,0001
	Nombre de nodules fonctionnels (nodules/plant)		
Dan Zahi	12a	66b	< 0,0001
KVX 61.1	7a	102b	< 0,0001

Les chiffres suivis de la même lettre dans la même ligne et se rapportant à une même entité fumée et non fumée ne sont pas significativement différents au seuil de p = 0.05

8.3.3.3.2. Rendement en fanes et en grains en fonction des EHS

La figure 108 présente les rendements en grains des variétés Dan Zahi et KVX 61.1 sur les entités de surface de types ST-SN fumées et non fumée fumées à Arraourayé. On observe une différence significative (p < 0,0001) entre les rendements en fanes des surfaces avec apport de fumier et les surfaces sans apport. On constate que l'apport du fumier a permis d'améliorer les rendements en fanes des surfaces ST-SN fumées par rapport à la surface « témoin » ST-SN non fumée. Les rendements pour les variétés Dan Zahi et KVX 61.1 sont passés, respectivement, de 224 kg/ha et 125 kg/ha sur la surface ST-SN non fumée à 948 kg/ha et 805 kg/ha les surfaces ST-SN fumées.

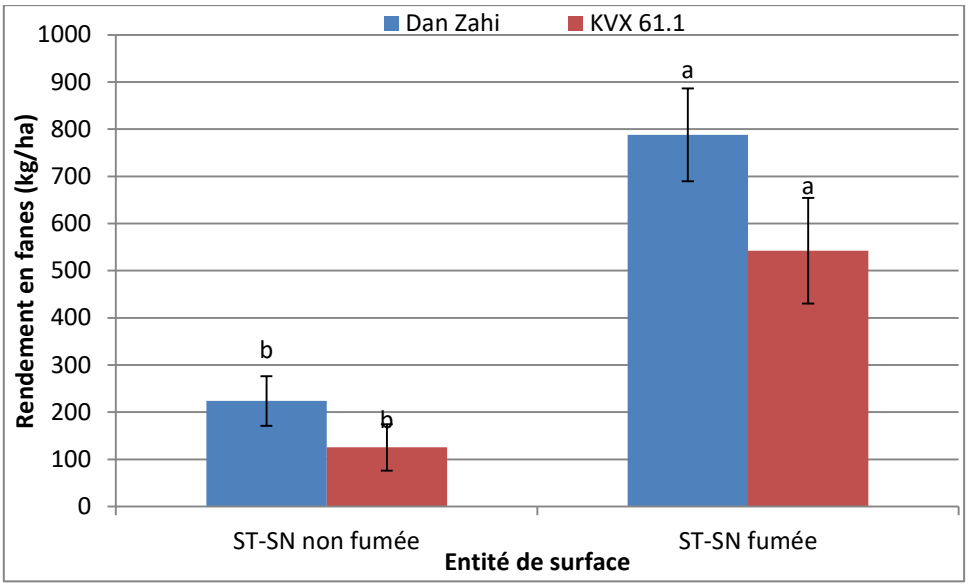


Figure 108: Rendement en fanes des variétés Dan Zahi et KVX 61.1 cultivées sur des EHS avec et sans apport de fumier à Arraourayé. ***Les histogrammes présentant la même lettre et se rapportant à une même entité fumée et non fumée ne sont pas significativement différents au seuil de p = 0.05.***

La figure 109 présente les rendements en grains des variétés Dan Zahi et KVX 61.1 sur les surfaces ST-SN fumées et non fumées. L'analyse de variance réalisée sur les résultats montre une différence significative du rendement en grains entre ST-SN non fumée et ST-SN fumée ($p < 0,0001$). L'apport de fumier améliore significativement la production en grains du niébé quelle que soit la variété. Les rendements varient de 7 kg/ha pour la variété Dan Zahi et 3 kg/ha pour la variété KVX 61-1 sur ST-SN non fumée à 298 kg/ha pour la variété Dan Zahi et 277 kg/ha pour la variété KVX 61.1 sur ST-SN fumée.

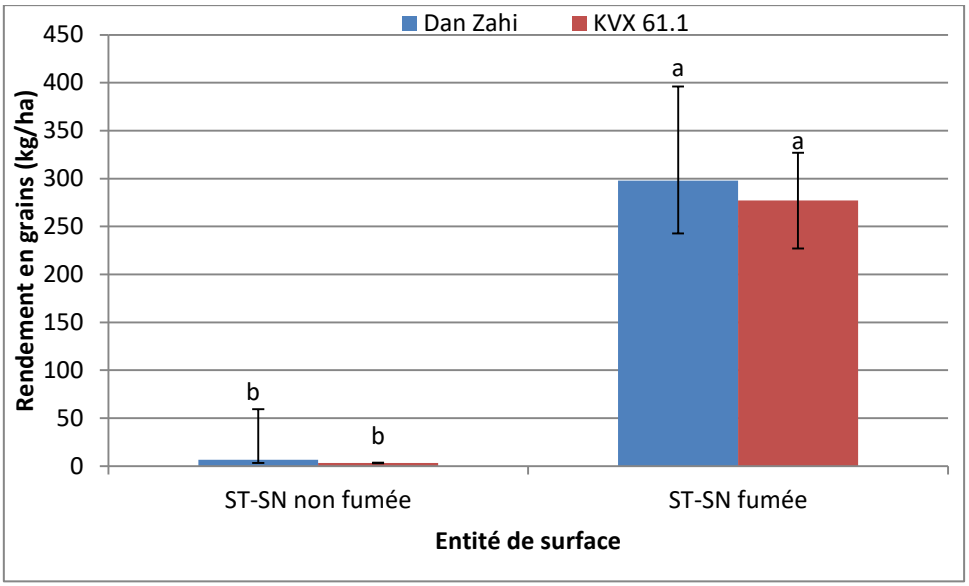


Figure 109: Rendement en grains des variétés Dan Zahi et KVX 61.1 sur les entités de surface avec apport et sans apport de fumier sur le site de Arraourayé. ***Les histogrammes présentant la même lettre et se rapportant à la même entité fumée et non fumée ne sont pas significativement différents au seuil de p = 0.05.***

8.3.3.4. Site de Tarna

8.3.3.4.1. Formation des nodules

Le tableau 65 présente le nombre de nodules totaux et fonctionnels formés sur les variétés Bartha et KVX 61.1 testés sur les surfaces ST-SN des sols ferrugineux et DEC-AL des sols alluviaux du *Goulbi* de Maradi ayant reçues ou pas un amendement en fumure organique. L'apport du fumier induit significativement ($p < 0,0001$) une meilleure nodulation entre ST-SN fumée ou non fumée mais n'a aucun effet sur les sols alluviaux (les valeurs restent relativement similaires entre DEC-AL non fumée et DEC-AL fumée). Les nombre de nodules sont passés de 36 nodules totaux et 31 nodules fonctionnels par plant pour la variété Bartha et 18 nodules totaux et 12 nodules fonctionnels par plant pour la variété KVX 61.1 sur ST-SN non fumée à 163 nodules totaux et 155 nodules fonctionnels par plant pour Bartha et 124 nodules totaux et 115 nodules fonctionnels par plant pour la variété KVX 61.1 sur les surfaces ST-SN fumée.

Tableau 65: Nombres de nodules totaux et fonctionnels mesurés sur les variétés Bartha et KVX 61.1 cultivées sur les parcelles fumées et non fumées à Tarna.

	ST-SN non fumée	ST-SN fumée	DEC-AL non fumée	DEC-AL fumée	p
Nombre de nodules totaux (nodules/plant)					
Bartha	36a	163b	32a	33a	< 0,0001
KVX 61.1	18a	124b	23a	32a	> 0,05
Nombre de nodules fonctionnels (nodules/plant)					
Bartha	31a	155b	27a	28a	< 0,0001
KVX 61.1	12a	115b	19a	24a	< 0,0001

Les chiffres suivis de la même lettre dans la même ligne et se rapportant à une même entité fumée et non fumée ne sont pas significativement différents au seuil de p = 0.05.

8.3.3.4.2. Rendement en fanes et en grains en fonction des EHS

La figure 110 présente le rendement en fanes des variétés Bartha et KVX 61.1 obtenus sur les surfaces ST-SN sur les sols ferrugineux et DEC-AL les sols alluviaux du *Goulbi* de Maradi fumées et non fumées Les rendements en fanes présentent une différence significative entre ST-SN non fumée et fumée (p < 0,0001) sur les sols ferrugineux tropicaux du site. En revanche, la différence n'est pas significative entre DEC-AL non fumée et fumée sur les alluvions du Goulbi (p> 0,05). L'entité ST-SN fumée enregistre des rendements plus importants (3547 kg/ha pour la variété Bartha et 983 kg/ha pour la variété KVX 61.1) que ST-SN non fumée (577 kg/ha pour la variété Bartha et 355 kg/ha pour la variété KVX 61.1).

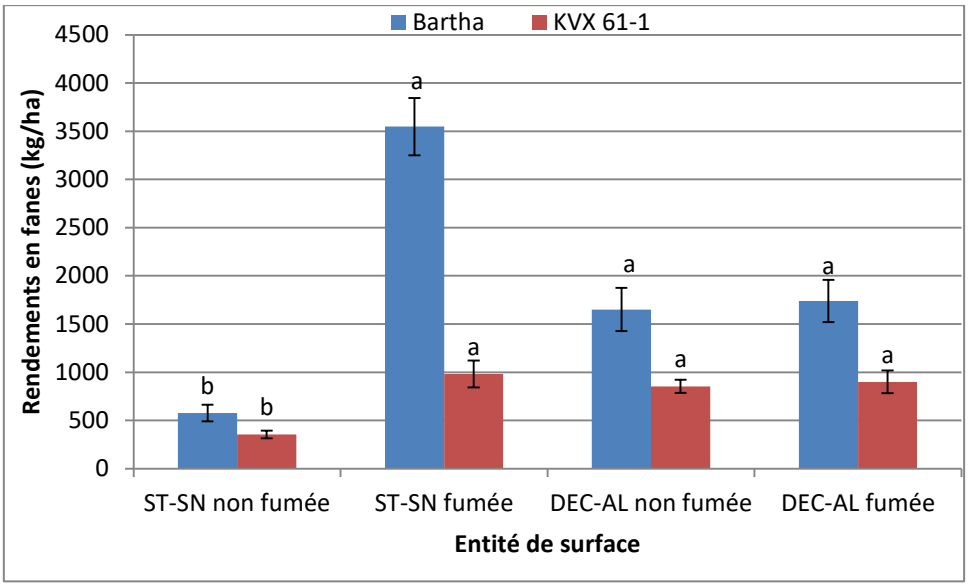


Figure 110: Rendement en fanes des variétés Bartha et KVX 61.1 sur les entités de surface avec apport et sans apport de fumier sur le site de Tarna. ***Les histogrammes présentant la même lettre et se rapportant à une même entité fumée et non fumée ne sont pas significativement différents au seuil de p = 0.05.***

La figure 111 illustre les rendements en grains des variétés Bartha et KVX 61.1 obtenus sur les surfaces ST-SN et DEC-AL fumées et non fumées du site Tarna. L'analyse de variance réalisée sur les résultats a montré qu'il existe une différence significative du rendement en grains entre ST-SN non fumée et fumée ($p<0,0001$) sur les sols ferrugineux. En revanche, sur les alluvions, aucune différence significative n'est observée ($p> 0,05$). Les rendements ont passé de 101 kg/ha pour la variété Bartha et 67 kg/ha pour la variété KVX 61.1 sur ST-SN non fumée à respectivement 407 kg/ha et 317 kg/ha sur ST-SN fumée.

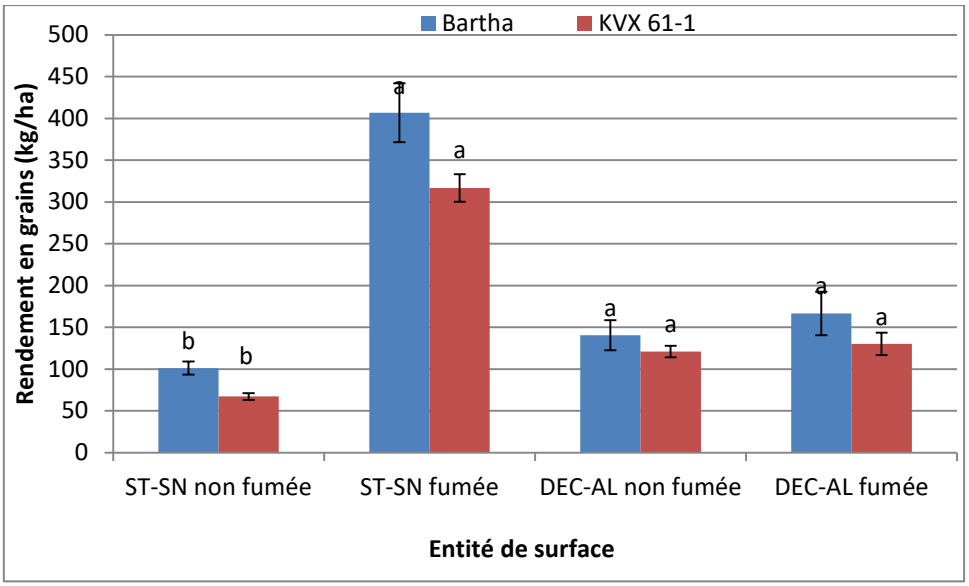


Figure 111: Rendement en grains des variétés Bartha et KVX 61.1 sur les entités de surface avec apport et sans apport de fumier sur le site de Tarna. ***Les histogrammes présentant la même lettre et se rapportant à la même entité fumée et non fumée ne sont pas significativement différents au seuil de p = 0.05.***

8.4. Discussion

Les résultats de cette étude relèvent trois aspects liés à l'influence de l'application de la fumure organique sur la qualité des sols des entités homogènes de surface à contrainte.

Le premier aspect est relatif à l'accroissement du pH, du taux de carbone d'azote et de phosphore, ainsi qu'une augmentation de la CEC et des bases échangeables consécutives à l'application de la fumure organique sur l'ensemble des sites. Ces résultats sont conformes à ceux obtenus par des nombreux travaux ayant analysés les effets de l'application du fumier ou la poudrette d'animaux dans le contexte sahélien (N'Dayegamiye, 1990 ; Bado *et al.,* 1997 ; de De Rouw , 1999 ; Hien, 2004 et 2012 ; Ambouta *et al.*, 2004 ; Meng *et al.,* 2005 ; Blanchard, 2014 ; Zeinabou *et al.*, 2014).

Le deuxième aspect concerne les effets de l'application du fumier sur les caractéristiques hydriques et hydrodynamiques des sols. Des teneurs moyennes en eau à la capacité au champ, au point de flétrissement, une réserve en eau utile et des valeurs de Ks plus élevées ont été mesurées sur l'ensemble des EHS à contraintes fumées comparées à celles qui n'ont pas reçues d'apport. Les valeurs de Ks enregistrées sur les surfaces ST-SN fumées sont supérieures à celles obtenues par Malam Abdou et al. (2015 et 2016) sur les

mêmes types de sols en contexte de jachères (8 mm/h) ou de champs cultivés sans apport de fumure organique (31 mm/h). Cela confirme les résultats de Gicheru et al. (2004) et Ouattara et al. (2006) qui ont montré que l'apport du fumier dans les parcelles agricoles permet d'améliorer la rétention et l'infiltration de l'eau.

Le troisième effet de l'apport du fumier est relatif à la formation des nodules et l'augmentation des rendements en fanes et en grains. Les nombres de nodules mesurés sur les différentes variétés de niébé cultivées sur les surfaces de type ERO + Fumier et ST-SN + Fumier sont de même ordre de grandeur que celles obtenues par Zongo (2013), plus de 120 nodules/plant dans le sahel burkinabé. Ils dépassent de loin les résultats obtenus les travaux de Madukwe *et al.* (2008) qui ont montré une amélioration de la nodulation de plusieurs variétés de niébé en zone tropicale du Nigeria en lien avec l'utilisation de fumier à base de bouse de vache et de fientes de volaille. Les fortes valeurs de nodules observées sur les surfaces amendées en fumier seraient liées à l'amélioration de la fertilité des sols, en particulier l'augmentation de la teneur en phosphore dans le sol. La présence de cet élément à des teneurs élevées, en effet, favorise la formation des nodules du niébé en particulier sur des sols pauvres en azote (Nkaa *et al.,* 2014 ; Ndor *et al.,* 2014 et Othman *et al.,* 1991, Jemo et al., 2006). L'absence du phosphore dans les amendements organiques n'améliore que très peu la nodulation du niébé en monoculture comme en cultures associées (Jemo et al., 2006 ; Dabré et al., 2016). Dabré et al (2016) ont obtenu 53 nodules/plant et une hausse de 59% de hausse de nodulation après amendment organique. La variabilité du nombre de nodules observés entre les saisons culturales dans le cadre de cette étude rejoignent ceux de Kouyaté *et al*. (2012) qui montrent que la formation des nodules chez le niébé est très variable d'une année à l'autre en lien avec les conditions pluviométriques.

Au total, les effets de l'apport de la fumure organique se traduisent à la fois sur la fertilité chimique et physique des sols. Cet apport induit une bonne nodulation du niébé qui permet d'augmenter considérablement la production. Les rendements obtenus sur les surfaces fumées dépassent largement ceux habituellement obtenus en milieu paysan au Niger. Cette pratique traditionnelle s'avère être efficace sur l'amélioration des capacités productives des entités homogènes de surface avec des contraintes édaphiques. Elle constitue une alternative durable de la gestion de la fertilité des sols et par là même constitue un levier pour optimiser la production de la culture du niébé dans les exploitations

familiales au Niger. L'intégration de l'élévage dans les sytèmes agricoles permet rendre systématique l'apport du fumier dans les champs agricoles.

8.5. Conclusion

Les résultats de cette étude montrent que l'application du fumier a une influence significative sur la qualité du sol entre EHS à contraintes non fumées et EHS à contraintes fumées. Elle permet de d'une part de corriger l'acidité des sols mais aussi à considérablement améliorer la fertilité chimique des sols. Les résultats révèlent que l'usage de la fumure organique a non seulement amélioré la capacité de rétention des sols des EHS à contraintes mais aussi leur Ks.

Il ressort que de cette étude que l'apport de fumier induit une bonne nodulation du niébé mais augmente également considérablement la production du niébé. Les rendements obtenus sur les surfaces fumées dépassent largement ceux habituellement obtenus en milieu paysan au Niger.

L'utilisation de la fumure organique, en occurrence le fumier, constitue une alternative durable de la gestion de la fertilité des sols mais aussi un levier à actionner pour optimiser la production de la culture du niébé dans les exploitations familiales au Niger.

Chapitre 9 : Discussion générale

9.1. Introduction

Ce travail de thèse a été axé sur l'hétérogénéité de la surface du sol, une caractéristique commune aux sols dans les agrosystèmes de la zone sahélienne. Il a porté sur deux régions sahéliennes du Niger (Tillabéri et Maradi) présentant des conditions agro-écologiques, pédoclimatiques et socio-économiques différentes vis-à-vis de la culture du niébé. L'approche développée a fait appel à des méthodes pluridisciplinaires relevant des sciences sociales, agronomiques, de la télédétection, de l'hydrologie et de la pédologie. Des enquêtes semi-directives ont été conduites auprès des producteurs du niébé afin de mieux connaître les savoirs locaux sur l'hétérogénéité de surface du sol et la gestion des contraintes pédologiques pour la production du niébé. Le suivi et la caractérisation des états de surface du sol et des propriétés hydrodynamiques réalisées *in situ*, ainsi que la détermination des propriétés physico-chimiques réalisées en laboratoire ont permis une meilleure connaissance de la fertilité et du potentiel agronomique des entités homogènes de surface identifiées dans les deux zones d'étude. Le suivi des paramètres agronomiques, à savoir la nodulation, les rendements en fanes et en grains de variétés locales et améliorées, a permis d'évaluer ce potentiel de production. Ainsi peut-on distinguer les entités homogènes de surface favorables à la production du niébé des entités de surface présentant des contraintes à la production du niébé. L'utilisation de la fumure organique comme stratégie paysanne pour améliorer la capacité productive des entités à contraintes a été testée par la détermination des propriétés physico-chimiques couplée aux mesures des paramètres agronomiques.

Cette partie sera consacrée au rappel et à la discussion des principaux résultats acquis afin de dégager des éléments utiles pour améliorer la production du niébé dans des parcelles avec une grande hétérogénéité de surface en zone sahélienne.

9.2. L'hétérogénéité de surface, une notion connue des producteurs de niébé au Niger

Les résultats des enquêtes semi-directives menées dans deux régions agricoles sahéliennes (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 développement des cultures, de rendements, de diversité des espèces végétales et de l'état de santé du sol en termes de son aptitude culturale et de son niveau de fertilité. Elle se traduit dans les pratiques culturales par le fait que les producteurs les 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., 2 018 ; Kuria et al., 2 018 ; 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., 2005ab ; 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.

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'arbustes comme *Annona senegalensis* sont aussi connues en zone sahélienne 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 fourmilières 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).

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 (Bielders *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 ; Bielders *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 (Bielders *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 (Toudou, 1986).

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 (Bielders *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).

9.3. L'hétérogénéité de surface du sol, une caractéristique commune aux agrosystèmes sahéliens

De nombreux travaux ont, en effet, révélé l'hétérogénéité de surface du sol comme une caractéristique majeure et commune aux sols des agrosystèmes sahéliens (Brouwer *et al.,* 1993 ; Herrmann *et al.,* 1994 ; Brouwer et Powell, 1998 ; Gandah, 1999 ; Gandah *et al.,* 2000 ; Casenave et Valentin, 1989 ; Thiombiano, 2000 ; Voortamn *et al.,* 2004). Elle peut se manifester sur des courtes distances, à l'échelle des parcelles agricoles, traduisant la microvariabilité de la surface du sol due aux changements dans la microtopographie et le couvert végétal, l'impact des pratiques culturales, les activités biologiques, la formation des croûtes et les effets de l'érosion diffuse (Casenave et Valentin, 1989 ; Herrmann *et al.,* 1994 ; Brouwer et Powell, 1998 ; Gandah, 1999 ; Thiombiano, 2000). L'hétérogénéité de surface du sol se manifeste également à plus grande échelle, reliée à la diversité de l'occupation du sol entre les surfaces dénudés, le couvert végétal, les champs cultivés, en jachère ou pâturés (Mahamane *et al.,* 2007 ; Souley Yéro, 2008 ; Amogo *et al.,* 2010 ; Souley Yéro, 2012 ; Descroix et Diedhiou, 2012).

Notre étude se situe au niveau de la microvariabilité observée dans les champs cultivés. Elle a permis (i) d'identifier et évaluer les proportions occupées par les entités homogènes de surface du sol et (ii) de caractériser les propriétés physico-chimiques de ces différentes entités.

Les entités homogènes de surface du sol identifiées sont celles liées aux modifications des états de surface, notamment la formation des croûtes, les activités biologiques qui induisent les changements dans la microtopographie, et le couvert végétal. Les entités de surface identifiées regroupent les surface liées aux croûtes d'érosion (ERO), aux croûtes de décantation (DEC), aux croûtes de dépôts éoliens autour de *Guiera senegalensis* (EOL-GS), aux croûtes structurales associées au houppier de *Faidherbia albida* (ST-FA), aux croûtes structurales associées aux fourmilières (ST-F), aux croûtes structurales (ST-SN), aux croûtes de décantation sur alluvion (DEC-AL), aux croûtes de décantation sur alluvion et sous le

houppier de *Faidherbia albida* (DEC-AL-FA). La nature et l'occupation spatiale de ces EHS au sein des parcelles varient selon la région et la nature des sols. Les EHS les plus représentées sont liées aux croûtes structurales sur les sols ferrugineux tropicaux (ST-SN) dans la région de Tillabéri et aux croûtes de décantation sur les sols alluviaux dans la région de Maradi (DEC-AL). Les surfaces de type ERO, particulièrement présentes dans la région de Tillabéri, viennent en seconde position en terme de surface occupée. L'extension de ces surfaces dégradées se fait au détriment des entités productives, traduisant l'impact de la pression anthropique et l'accentuation des phénomènes érosifs. La baisse des surfaces cultivées qui accompagne l'extension des surfaces de type ERO entre 1975 et 2009 est estimée à plus de 15 % (de 69 à 54 %) selon les travaux de cartographie diachronique réalisés par Abdourahamne Touré *et al.* (2010).

Les entités de surface associées au couvert ligneux occupent de faible proportion dans les champs agricoles. Cela est due à la faible couverture végétale des sites étudiés en lien avec le deboisement pour des besoins énergetiques et la mise en culture (Lebreton, 2009 ; Souley Yéro, 2012 ; Descroix et Diedhiou, 2012 ; Moussa Issaka, *et al.,* 2016). Certaines cultures de rente comme le souchet necessitent la coupe des ligneux afin de faciliter les opérations culturales (Larwanou et al., 2010). Plus de 200 000 ha de couvert végétal disparaissent chaque année pour des besoins alimentaires et énergétiques, alors que les efforts de reboisement ne dépasse guère 5 000 ha (CEDEAO/CILSS, 1999). Le taux de reduction annuelle du couvert végétal est estimé à 2,7 % dans l'Ouest du Niger et 3,7% sur l'ensemble du pays (Hiernaux *et al.,* 2009 dans Descroix et Diedhiou, 2012). Des tendance similaires et de même ordre de grandeur sont observées au Burkina Faso (Bene et Fournier, 2014) et au Mali (Spiekermann et al., 2014).

L'hétérogénéité de surface observée dans les champs influe sur le fonctionnement, l'état de fertilité, la qualité physique et chimique du sol (Brouwer *et al.,* 1993 ; Geiger et Manu, 1993 ; Davis et al., 1995 ; Manu et al., 1996 ; Gandah et al., 2000 ; Voortman et al., 2003 ; Brouwer, 2008). La variabilité des propriétés physiques et chimiques des sols à l'échelle des parcelles cultivées a fait l'objet d'étude dans de nombreux contextes, notamment au Kenya (Tittonel et al., 2005a,b ; 2013), En France (Zwaenepoe et Le Bars, 1997 ; Tourino-Soto, 2005), en chine (Jin et Jiang, 2001 ; Zhang et al., 2007; Wei et al., 2008 ; Wang et al., 2009 ; Bai et Wang, 2011 ; Xao et al., 2011 ; Zhang et al., 2011). Les résultats de

notre étude apportent des données relatives aux sols alluviaux et aux sols ferrugineux tropicaux en contexte sahélien. Les entités homogènes de surfaces des sols alluviaux s'avèrent plus riches en nutriments comparées aux entités liées aux sols ferrugineux tropicaux. Sur ces derniers, les entités homogènes de surface liées aux zones en dépressions sont celles qui montrent les plus fortes teneurs en nutriments et en particules fines. Cette caractéristique favorable à la fertilité chimique des sols est liée à la position topographique de ces surfaces qui permet l'accumulation des particules fines et les débris organiques drainés par l'eau de ruissellement et le vent depuis les surfaces environnantes. Ces résultats sont conformes à ceux obtenus par Hamadou Younoussa et al. (2018) dans l'Ouest nigérien qui ont montré l'importance des surfaces en dépression dans l'accumulation des nutriments sur des sols similaires. L'importance de la topographie sur la variabilité de surface a été prouvée par Burke et al. (1999) et Wei et al. (2007). Après ce type de surface, les entités de surface en lien avec la présence du couvert agroforestier (EOL-GS et ST-FA) et l'activité de la macrofaune du sol (ST-F) sont les plus riches en nutriments dans les parcelles agricoles. Les entités de surface ERO et ST-SN sont, en termes de nutriments du sol, les surfaces les plus pauvres. La pauvreté de ces entités serait liée au décapage régulier de leur horizon de surface par l'érosion hydrique et éolienne (Bielders et al., 2000 ; 2004).

9.4. L'hétérogénéité de surface du sol, une caractéristique variable dans le temps

La dynamique d'évolution temporelle des croûtes de surface décrite par de nombreux travaux en zone sahélienne (Valentin, 1981 ; 2018), Valentin et Bresson, 1992 ; Peugeot, 1995) est un des facteurs déterminant le caractère dynamique des entités de surfaces liées à l'hétérogénéité de la surface. Dans le présent travail, ce caractère a été révélé par le suivi des croûtes superficielles qui se forment à la surface des entités homogènes au cours des stades phénologiques du niébé. Sur les EHS de type DEC, DEC-AL, et DEC-AL-FA les croûtes se reconstituent dès les premières pluies qui surviennent après le sarclage. Sur les entités de type ST-SN, ST-FA, et ST-F, la reconstitution procède à travers la fragmentation des agrégats et l'agencement des particules par les effets conjugués du "splash" et de la lame d'eau ruisselante. Le développement de croûte d'érosion est une tendance générale observée sur les EHS de types ST-SN et ST-FA. Celle-ci est liée aux fortes intensités des précipitations, à la

faible couverture végétale et à la faible teneur en matière organique qui induisent une forte sensibilité à l'encroûtement, surtout sur des entités comme ST-SN (Valentin, 1985 ; Casenave et Valentin, 1992 ; Hiernaux *et al.,* 1999). Cette observation est conforme aux résultats des travaux de Ndiaye *et al.* (2005) qui montrent que la surface des sols cultivés dans le bassin arachidier du Sénégal au cours de la saison des pluies est occupée à 60% par des croûtes d'érosion et à 40% par des croûtes structurales. Les entités de type ERO se caractérisent par la disparition progressive de la végétation généralement après le stade de levée du niébé jusqu'à sa disparition après le stade de ramification. Ce type de croûte reconnue pour sa dureté et sa faible capacité d'infiltration est défavorable au développement des cultures. Elle compromet la croissance de la culture de niébé en empêchant mécaniquement la germination, la levée et la croissance des cultures (Casenave et Valentin, 1989, Souty et Rode 1994). Les travaux de Souty et Rode, (1994), révèlent qu'en général les encroutements superficiels constituent un obstacle majeur à la levée des plantules ainsi qu'à leur émergence en réduisant la diffusion de l'oxygène et le transfert de chaleur vers le lit de semence, en plus de constituer une résistance à la pénétration racinaire. Le développement des croutes biologiques au cours de la saison culturale a été observé à la surface de certaines entités de surface homogènes, à savoir ST-FA. Ce type de croûtes est connue pour leur capacité à stabiliser la surface du sol et à améliorer la qualité organique des sols des zones arides (Malam Issa et al., 1999 et 2001 ; Belnap et Lange, 2001 ; Belnap, 2005). La présence de ces croûtes sur les EHS ST-FA confirment les résultats des travaux qui soulignent la qualité organique des surfaces associées au *Faidherbia albida*, considérées comme des îlots de fertilité dans les parcelles agricoles (Bationo *et al.,* 2012).

9.5. Variabilité des propriétés hydriques des sols au sein des entités homogènes de surface (ESH)

Les travaux réalisés dans le cadre de cette étude ont montré que l'hétérogénéité consécutive à la diversité des entités homogènes de surface dans les parcelles agricoles entraine une variabilité des propriétés hydriques des sols. Ces travaux rejoignent ceux de Rawls et al., (2003) et Jacobs et al., (2004) qui ont montré que l'hétérogénéité de surface du

sol affecte le régime hydrique des sols. La capacité de rétention en eau est plus importante au niveau des entités de surface DEC. Les résultats ont montré, à l'échelle de l'EHS, une variabilité de la capacité de rétention et de la réserve en eau utile. Cette variabilité des propriétés est en premier lieu associée à la nature différente des matériaux entre les EHS. Ainsi a-t-on obtenu les teneurs en eau à la capacité au champ et au point de flétrissement permanent ainsi que la réserve d'eau utile les plus élevées sur les surfaces de types DEC et ERO. Ces types de surface, en effet, se caractérisent par la présence significativement élevée de matières organiques et de particules fines (texture fine), mais également par la densité apparente la plus élevée par rapport aux autres entités (ST-FA, EOL-GS et ST-FA). Ce résultat est conforme aux observations de Bourrié (2018) qui précise l'importance de la variabilité de la nature des sols sur l'hétérogénéité des propriétés de rétention en eau. Nos résultats sont également cohérents avec ceux de Yang *et al.* (2014) et Hishe *et al.* (2017) qui ont montré que les capacités de rétention en eau élevées sont associées à des teneurs en particules fines et en matières organiques et à des valeurs des densités apparentes élevées.

Les résultats de mesure de Ks montrent les valeurs les plus élevées sur les EHS de type EOL-GS et les plus faibles sur les surfaces de types ERO et DEC. Cette variation de Ks peut être la conséquence de différences de densité apparente, de porosité, de matière organique ou de texture. Les entités EOL-GS, en effet, présentent la densité apparente la plus faible et la proportion de sable la plus élevée par rapport aux autres EHS. Ce type d'entité de surface est constitué principalement par des dépôts éoliens sableux, caractérisé par une forte porosité et des valeurs de perméabilité et Ks relativement élevées (Casenave et Valentin, 1989). Les valeurs de Ks enregistrées sur les EHS de type EOL-GS, ST-FA sont supérieures à celles obtenues par Malam Abdou *et al.* (2015; 2016) sur des sols sableux de l'ouest nigérien : 3 mm h^{-1} sur des croûtes biologiques, 6 mm h^{-1} sur ERO, 8 mm h^{-1} dans les jachère et 31 mm h^{-1} dans les zones cultivées comparables au ST-SN de notre étude. Elles sont du même ordre de grandeur que celles obtenues par Touma *et al.,* (1999) sur des sols ferrugineux en zone sahélienne du Sénégal (65,8 mm.h^{-1}). Les faibles valeurs de Ks sur ERO et DEC peuvent être liées à leur densité apparente élevée, associée à une faible porosité texturale des teneurs relativement élevés en particules fines par rapport à d'autres EHS. Des études antérieures sur les sols ferrugineux tropicaux dans la partie sahélienne du Burkina Faso ont montré que Ks est faible dans les sols dont la densité apparente et les teneurs de

particules fines sont élevées (Savadogo *et al.,* 2017). Les travaux de Giertz *et al.,* (2005) ont montré que des densités apparentes élevées sont associées à des conductivités hydrauliques faibles et inversement.

En plus des variabilités liées aux caractéristiques intrinsèques des sols, nos résultats révèlent la diminution considérable et régulière du Ks sur toutes les EHS en fonction des cumuls des pluies après le travail du sol. Cela montre le fait qu'aucun sol ne peut résister longtemps à l'agressivité liée aux fortes pluies comme l'avait expliqué Valentin (2018). Les valeurs de Ks sont élevées juste après le travail du sol et deviennent faibles après un certain cumul de pluie. Cette tendance a été mise en évidence dans les travaux de Ndiaye *et al.,* (2005), Malam Abdou *et al.,* (2015) et Malam Abdou, (2016). Cela montre à la fois l'importance du travail du sol pour l'infiltration du sol et les limites de son effet. Ceci est cohérent avec plusieurs études antérieures montrant que le travail du sol n'a pas d'effet sur la réponse hydrologique des sols à partir d'un certain cumul de pluie. Les travaux de Ndiaye et al. (2005), Malam Abdou, (2014), Malam Abdou *et al., (*2015 ; 2016) ont montré qu'après le sarclage le Ks diminue drastiquement de 120 $mm.h^{-1}$ (valeur caractéristique des entités cultivées dominées par des croûtes structurales) à 10 $mm\ h^{-1}$ (valeur obtenue sur des surfaces occupées par des croûtes d'érosion). Cette tendance globale applicable aux surfaces nues occupées par les croûtes structurales dans les champs cultivés (ST-SN, la plus répandue spatialement) ne tient pas compte des autres types de surfaces à l'intérieur des champs. Nos résultats révèlent que certaines EHS s'avèrent plus vulnérables à l'évolution du Ks liée aux pluies. En effet, l'impact du travail du sol persiste sur des entités comme EOL-GS même après 300 mm de pluie, soit environ le double de la pluie cumulée observée par Malam Abdou *et al.* (2015) sur des surfaces labourées. L'évolution des EDS sur les entités de surface homogène de type EOL-GS n'a pas montré de développement de croûtes d'érosion. Au contraire, les surfaces de type ST-FA montre une évolution des EDS similaire à celles des surfaces de type ST-SN, ERO, DEC, c'est-à-dire marquée par le développement progressif de croûtes d'érosion et de croûtes biologiques connues pour leurs faibles capacités d'infiltration (Malam Issa, 2007, Malam Issa *et al.,* 2011). Les études de Thebe (1987) citées par Peugeot (1995) et Malam Abdou *et al.*, (2015) montrent qu'une couverture végétale inférieure à 57% n'a pas d'influence significative sur l'infiltration de sol dans la partie sahélienne du Cameroun, ce qui est probablement le cas des EHS étudiées dans le cadre de

cette étude (< 50%). Les faibles variations et les faibles valeurs du Ks observées sur DEC et ERO s'expliquent par la reconstitution rapide des croûtes de décantation et d'érosion qui les caractérisent et qui créent une barrière hydraulique par obstruction des pores. Le travail du sol, surtout très superficiel, n'a donc que peu d'intérêt sur ces surfaces.

9.6. Influence de l'hétérogénéité de surface du sol sur la nodulation et la production du niébé

Les résultats obtenus au cours de la présente étude ont permis de mettre en évidence l'influence de l'hétérogénéité de surface du sol sur la nodulation et les rendements en fanes et en grains du niébé. L'hétérogénéité de la surface du sol influence significativement la formation des nodules totaux et fonctionnels. Ceci peut être lié aux propriétés du sol qui varient d'une entité homogène de surface du sol (EHS) à une autre. Ces propriétés, qui conditionnent la formation des nodules chez le niébé, sont notamment l'acidité, la température, l'humidité, les carences en éléments nutritifs, la structure et la présence des bactéries fixatrices d'azote (Day *et al.,* 1978 ; Zahran, 1999 ; Waligora et Thierry, 2008). La formation des nodules totaux et fonctionnels est beaucoup plus importante au niveau des entités ST-FA quels que soient le site ou la variété considérés. La forte nodulation observée sur cette EHS pourrait s'expliquer par la physiologie de l'espèce végétale associée à cette surface, en particulier ici l'espèce *Faidherbia albida*. Cette espèce est en effet elle-même une légumineuse. Ceci est favorable à la formation des nodules et au développement des bactéries fixatrices d'azote et à l'enrichissement du sol en cet élément. De ce fait les sols sur cette EHS sont probablement riches en souche de bactéries du genre Rhizobium et Bradyrhizobium, responsables de la nodulation chez le niébé. Les résultats obtenus par Dupuy *et al*. (1992) montrent en effet des teneurs très élevées en Bradyrhizobium, soit 1270 Rhizobia/g de sol au Sénégal dans la zone sahélienne, et plus de 13 000 Rhizobia/g de sol dans la zone soudano-guinéenne sous houppier de *Faidherbia albida.* Le nombre de nodules totaux obtenu dans le cadre de cette étude, principalement sur les entités ST-FA*,* EOL-GS et DEC est plus élevé que celui publié par Souhoure (2010) qui a rapporté 19 nodules par plant. Seule l'entité ST-FA présente une nodulation aussi importante que celle obtenue par Kouyaté *et al*. (2012) qui ont trouvé des valeurs entre 30 et 41 nodules par plant sur des

surfaces de sol nu (ST-SN). Nos résultats se trouvent dans la gamme de ceux publiés par Eaglesham *et al*. (1982) sur des sols ferrugineux tropicaux du Nigeria qui ont montré que le nombre de nodules formés varie en fonction du nombre de jours après le semis. Les valeurs trouvées par ces auteurs sont de 39 nodules/plant après 15 jours de semis, 42-48 nodules/plant après 25 jours de semis, 50-69 nodules/plant après 45 jours de semis, 44-103 nodules/plant après 57 jours de semis et 39-48 nodules/plant après 66 jours de semis (il faut noter le dénombrement des nodules dans le cadre de cette étude est fait après en moyenne 50 à 55 jours après le semis durant la phase de la floraison) . Dans les régions semi-arides du Nord-est du Brésil, le nombre de nodules formé varie entre 10 à 60 sur des racines de niébé inoculé par les bactéries BR 3268 et BR 237 (Martins *et al.,* 2003).

Les plus faibles valeurs de nodules totaux et fonctionnels sont obtenues au niveau des EHS de type ERO et ST-SN sur les sols ferrugineux tropicaux. Ce résultat serait lié au décapage de la couche meuble de surface concentrant l'essentiel de la fertilité du sol, suivi d'une compaction et d'un encroûtement consécutif à la formation des surfaces de type ERO suite à l'impact des gouttes de pluie et l'élimination des éléments les plus fins associés aux nutriments par le vannage de la couche de surface par le vent de l'harmattan (Ambouta *et al.,* 1996). Ces deux types de surface présentent les caractéristiques les plus contraignantes pour la formation des nodules (Waligora et Thierry, 2008). Les valeurs relativement élevées de nodules sur les surfaces ST-FA, EOL-GS et DEC par rapport aux EHS ERO et ST-SN s'expliqueraient par la baisse de la température occasionnée par l'ombrage pour les deux premiers, et par la plus grande quantité d'eau retenue sur DEC (Dart et Mercer, 1965 ; Dakora et Keya, 1997). Par ailleurs, malgré la fertilité du sol relativement importante observée au niveau des surfaces DEC-AL et DEC-AL-FA par rapport aux autres EHS, il ressort que la nodulation est plus faible sur ces EHS des sols alluviaux que sur les EHS des sols ferrugineux. Ceci est toutefois contradictoire, car tout comme la croissance végétative et la production en fanes et en grains, la formation des nodules du niébé est fonction de la fertilité des sols. Ces valeurs basses de nodules obtenues sur ces surfaces seraient liées aux conditions d'engorgement des sols qui prévalent après les évènements pluvieux et qui perdurent souvent. Ces travaux rejoignent ceux de Minchin et Summerfield (1976) qui ont montré que huit jours d'engorgement des sols suffisent à réduire de 60% le poids des nodules et l'efficacité de la nodulation. Il faut noter que l'importance de l'humidité sur la

nodulation a été prouvée par plusieurs études antérieures comme celles de Habish et Mahdi (1976) et Boutraa et Sanders (2001), mais l'engorgement temporaire de ces sols constitue une contrainte majeure au développement des racines des cultures comme l'expliquent Goldsworthy et al. (1984) et Blanchard (2010) et peut donc entrainer un frein au développement des nodules.

Les effets de l'hétérogénéité de surface du sol sur la production du niébé se traduisent par une variabilité des rendements en fanes et en grains du niébé entre les EHS sur l'ensemble des sites d'étude. Ces résultats sont cohérents avec ceux de Batchelor *et al*. (2002) et Basso *et al*. (2001) qui ont mis en évidence la très grande variabilité des rendements des cultures dans un même champ. Leurs conclusions sous-entendent l'existence dans les parcelles agricoles d'entités qui produisent plus que d'autres. Les résultats de notre étude ont permis d'identifier et de hiérarchiser les types d'EHS en fonction de leur potentiel de production du niébé par site. Sur les sites de Banizoumbou et Sadoré (région de Tillabéri), l'EHS ST-FA (sous la canopée de *Faidherbia albida)* est l'entité sur laquelle les plus fortes valeurs de rendements en fanes et en grains ont été enregistrées. Plusieurs études antérieures ont déjà montré que cette surface améliore la production des cultures (Depommier *et al.,* 1992 ; Vandenbeldt et Williams, 1992 ; Geiger et Manu, 1994 ; Kho *et al*., 2001 ; Smektala *et al*., 2005) en raison de la fertilité du sol induite par cette espèce végétale. Cette fertilité serait en partie due à la décomposition des feuilles de cet arbre et des excréments d'animaux. En effet, durant la saison sèche, les animaux se regroupent préférentiellement sous le houppier de cet arbre pour brouter les fruits mûrs et les feuilles qui tombent naturellement ou qui sont coupées pour eux par les éleveurs. De plus, la litière issue de la décomposition foliaire de cette espèce est réputée améliorer la croissance et le rendement des cultures telles que le mil et le maïs comme le montrent les travaux de Diallo *et al.* (2008). Cette concentration de la matière organique fait de cette entité un îlot de fertilité, qui en conséquence améliore la production des cultures. Les rendements en fanes et en grains y dépassent en général ceux obtenus en milieu paysan au Niger qui sont respectivement 400 kg/ha et 120 kg/ha de niébé (Brink et Belay, 2006 ; Yoka *et al.,* 2014).

Sur les sites de Arraourayé et Tarna (région de Maradi), les résultats démontrent que c'est plutôt les surfaces autour des couronnes des fourmilières qui constituent les zones les

plus productives en niébé. En effet, ces fourmilières sont connues pour avoir une influence sur l'augmentation de l'infiltrabilité des sols et l'accumulation et la décomposition de la matière organique (Dupuis et Verger, 1964 ; Dostál *et al.,* 2005 ; Farji-Brener et Werenkraut, 2017 ; Hole, 1981 ; Lavelle *et al.,* 1997 et Folgarait, 1998), conditions toutes aussi importantes à une meilleure production du niébé.

Les résultats ont démontré qu'à côté de ces deux EHS, les surfaces EOL-GS et DEC sont des zones plus productives que les EHS de référence ST-SN et les EHS ERO. Ces résultats confortent ceux de Dan Lamso *et al*. (2015a,b) et Wegel (2002) qui ont montré que les buttes autour des touffes de *Guiera senegalensis* augmentent la productivité des cultures par l'amélioration de la fertilité des sols, de la circulation de l'eau et du bon développement racinaire des cultures grâce entre autres à la décomposition de la matière organique piégée et aux effets bénéfiques de l'activité biologique. Les rendements importants observés sur les surfaces ST-FA et EOL-GS pourraient également s'expliquer par la densité de semis nettement plus élevée au niveau de ces EHS par rapport aux autres. Karim *et al.* (2016) et Taffouo *et al*. (2008) rapportent que l'augmentation de la densité de semis du niébé entraine une augmentation de la biomasse en fanes et en grains du niébé en association avec le mil. Cependant, cette thèse fait l'objet de controverse par plusieurs auteurs tels que Useni *et al.* (2014) qui rapportent que l'augmentation de densité de semis n'a pas une influence significative sur la croissance et le rendement du niébé. Ahmed *et al*. (2010) expliquent que la forte densité des plants/m² entraine une diminution des rendements par plant et une augmentation des rendements par unité de surface.

Les entités de surface les moins productives sont essentiellement les EHS ERO et ensuite ST-SN sur les sols ferrugineux et DEC-AL-FA sur les sols alluvionnaires du Goulbi de Maradi, avec des faibles rendements en fanes et en grains par rapport à la moyenne en milieu paysan. Les rendements sont presque nuls sur l'hétérogénéité de type ERO et ce quelles que soient la variété de niébé ou la saison culturale considérée. En effet, l'entité de type ERO, de par ses propriétés, est connue pour les pertes de semis et de rendements auxquelles elle est associée dans les champs paysans. Ces résultats vont dans le sens de ceux de Awadhwal et Thierstein (1985) qui ont montré qu'habituellement ces croûtes posent un problème sérieux aux cultures et inhibent l'émergence des cultures comme le niébé, le mil, le sorgho et le maïs. Ce problème est lié au caractère compact de la surface du

sol sur ce type de surface qui entraine une mauvaise condition de circulation de l'eau, de germination, de levée et d'enracinement (Ambouta *et al*., 1996). Pour les EHS DEC-AL–FA, la faiblesse des rendements est surtout liée au développement important des adventices qui empêche la croissance du niébé ou de toutes autres cultures. En effet cette surface constitue un microclimat favorable à l'émergence des parasites capables d'endommager le niébé tout au long de son cycle.

Les résultats de cette étude ont montré que les variétés locales des sites sont plus productives que la variété améliorée KVX 61.1. Ceci s'explique par le fait qu'en milieu paysan, les rendements dépendent des aléas climatiques, du respect du calendrier cultural et des itinéraires techniques, et qu'en plus, les variétés améliorées exigent un minimum d'entretien phytosanitaire et un certain niveau de fertilité du sol (Ouédraogo, 2005). Les travaux de Aly *et al.* (2017) montrent que les variétés locales de niébé produisent plus que certaines variétés améliorées. Ces résultats sont en désaccord avec ceux de Affokpon *et al. (*2013) qui ont montré que les variétés de niébé améliorées sont en général plus productives que les variétés locales. Le non-respect de l'itinéraire technique des variétés améliorées par les paysans serait en grande partie la cause des rendements faibles de la KVX 61.1 par rapport aux variétés locales dans leurs champs (Falalou, 2016 : Communication personnelle).

Les résultats obtenus démontrent qu'il y a une variabilité spatiale intra-EHS des rendements en fanes et en grains mais aussi de la nodulation entre les sites. Cette variabilité serait liée aux degrés d'impact des facteurs qui influencent les rendements et la nodulation du niébé. Parmi ces facteurs, on peut citer les pratiques culturales, l'utilisation de variétés différentes, la pluviométrie mais aussi les attaques des ennemis des cultures qui pourraient changer d'un site à un autre. Les travaux de Alene *et al.* (2006) ont montré que les sources de variation des rendements de niébé sont surtout liées à l'adoption différentielle des technologies des semences, des pesticides, des engrais qui sont d'ailleurs liés aux modèles de pratiques propres à chaque agriculteur. Pour Blade *et al.* (1992), le manque d'utilisation des pesticides serait une source de variation des rendements. Nos résultats sont en accord avec ceux de Adejuwon (2005) qui indiquent que la pluviométrie figure parmi les déterminants les plus puissants de la croissance et des rendements des cultures comme le niébé. En effet, nos résultats ont montré qu'au cours des années où les précipitations sont

exceptionnellement faibles comme en 2016, à Arraourayé, la capacité du niébé à produire devient très faible.

9.7. L'apport du fumier une solution pour améliorer la production du niébé sur les entités homogènes de surface à contraintes

L'apport du fumier sur les entités à contraintes (ERO, ST-SN et DEC-AL) a permis d'améliorer significativement la fertilité des sols. Cet effet est relatif à une augmentation du pH observée au niveau des entités à contraintes après l'application du fumier. Sur ST-SN et ERO fumées sont plus proche de la neutralité. La même tendance à l'amélioration a été observée sur ERO. Le pH est de de 4,8-4,9 sur ERO non fumée à 6,1-6,4 ERO fumée. Nos résultats sont conformes à ceux de Bationo et Mokwunye, (1991) qui ont montré que l'apport du fumier permet d'améliorer le pH de 4,9 à 6,21 sur des sols sableux de l'Ouest nigérien. Ces valeurs sont faibles à celles obtenues par Bado et al., (1997) sur des sols ferralitiques au Burkina Faso où le pH est passé de 4,3 sur sols témoins à 5,3 sur des sols fumés. Après l'apport du fumier sur les EHS ERO et ST-SN, le taux de carbone a significativement augmenté sur les entités fumées. Les travaux de Mando *et al,.* (2005) montrent des augmentations et des valeurs de même ordre de grandeur que les nôtres. L'apport du fumier améliore le taux de carbone total du sol de 0,3 à 0,5 % sur des sols sableux au Burkina Faso. Les travaux de Hien et al., (2003) ont montré que le fumier traditionnel apporté à raison de 2 t MS/ha/an pendant 13 ans entraine une augmentation, de 9 t de carbone par an/ha. Les teneurs en azote connaissent également la même amélioration. Nos résultats sont cohérents avec ceux de Agbede et al., (2008) et Adeleye et al., (2010) qui ont mesuré, respectivement, une augmentation de 1 à 2,5 g/kg sur des Luvisols au Sud-ouest du Nigéria.

L'amélioration de la fertilité, des conditions de rétention et de circulation de l'eau des sols en lien avec l'application du fumier sur les entités à contraintes se traduit par une augmentation de la nodulation et de la production du niébé (Bado, 2002 ; Shirani et al., 2002, Madukwe et al., 2008, Shaharden et Seran, 2013 ; Zeinabou et al., 2014, Haro et al., 2016, Rabé et al., 2017). La nodulation et la production du niébé sont plus importantes au niveau des surfaces fumées par rapport à l'ensemble des EHS sur le site de Banizoumbou.

Contrairement aux travaux de Gomgnimbou et al. (2017) qui montre que la fumure organique n'a pas d'effet à moyen terme sur la nodulation et la production du niébé, nos travaux ont montré que l'application du fumier permet d'améliorer la nodulation et la production du niébé.

CONCLUSION GENERALE ET PERSPECTIVES

La présente étude a pour objectif global d'évaluer la prise en compte de l'hétérogénéité de surface du sol sur la production du niébé dans les exploitations familiales au Niger. Elle vise spécifiquement (i) la compréhension des savoirs locaux sur l'hétérogénéité de surface du sol et sa gestion en lien avec la culture du niébé, (ii) la hiérarchisation des entités homogènes de surface du sol (EHS) en fonction de leur niveau de fertilité et de leur potentiel de production du niébé, (iii) la cartographie et la caractérisation des propriétés physico-chimiques de ces EHS (iv) l'évaluation de l'influence de l'HSS sur le fonctionnement et les propriétés hydrodynamiques des sols ; (v) la détermination de l'impact de l'HSS sur la production du niébé et enfin (vi) l'évaluation de l'effet de la fumure organique sur la qualité et la production du niébé.

Dans le cadre de cette étude, les formes d'EHS répertoriées sur les sites regroupent les EHS liées aux croûtes d'érosion (ERO), aux croûtes de décantation (DEC), aux croûtes de dépôts éoliens autour de *Guiera senegalensis* (EOL-GS), aux croûtes structurales associées au houppier de *Faidherbia albida* (ST-FA), aux croûtes structurales associées aux fourmilières (ST-F), aux croûtes structurales (ST-SN), aux croûtes de décantation sur alluvion (DEC-AL), aux croûtes de décantation sur alluvion et sous le houppier de *Faidherbia albida* (DEC-AL-FA).

Au terme de cette étude, il ressort que l'hétérogénéité de surface du sol et les facteurs qui en sont responsables sont des notions bien connues des producteurs du niébé au Niger. La conscience des producteurs de l'hétérogénéité de surface du sol est liée à la nature du sol, au travail du sol, à l'érosion, à la topographie ou au couvert végétal. Il ressort de la hiérarchisation paysanne des EHS par la majorité des producteurs que les EHS de type ST-FA sont plus fertiles et productives dans les parcelles agricoles alors les EHS de type ERO et ST-SN sont considérées comme à contraintes. Selon les producteurs, le développement des croûtes d'érosion, le faible niveau de fertilité, l'érosion et la faible capacité de rétention en eau des sols constituent les principales contraintes sur ces EHS. Pour contourner ses contraintes, l'utilisation de la fumure organique est la stratégie la plus utilisée par les producteurs pour optimiser la production du niébé.

Les résultats de la cartographie de l'HSS ont permis d'avoir une vue spatiale de l'HSS et de connaitre l'importance des EHS dans les champs agricoles. Les EHS couvrant le plus de surface sont liées aux croûtes structurales sur les sols ferrugineux tropicaux (ST-SN) dans la région de Tillabéri et Maradi et aux croûtes de décantation sur les sols alluviaux dans la région de Maradi (DEC-AL). Les résultats ont révélé que l'HSS a une influence sur les propriétés physico-chimiques des sols des différentes EHS. Les EHS des sols alluviaux sont plus riches en nutriments comparées aux entités liées aux sols ferrugineux tropicaux. Sur ces derniers, les EHS DEC sont celles qui montrent les plus fortes teneurs en nutriments et en particules fines.

Cette étude a montré que l'HSS influence sur les propriétés hydrodynamiques des sols. Les résultats ont montré que le Ks est toujours plus important sur les EHS EOL-GS et plus faible sur DEC-AL et ERO. L'étude de la dynamique du Ks au cours de la saison culturale a montré que les valeurs sont élevées juste après le travail du sol et diminuent progressivement après un certain cumul de pluie. Cela montre à la fois l'importance du travail du sol pour l'infiltration du sol et les limites de son effet. Toutefois, l'évolution du Ks est variable d'une EHS à l'autre et en lien avec le développement des états de surface (EDS). En effet, l'impact du travail du sol persiste sur des entités comme EOL-GS même après 300 mm de pluie. Cela peut-être dû à l'évolution des EDS, le développement des croûtes d'érosion n'a pas été observé. Au contraire, la décroissance progressif du Ks est plus rapide sur des surfaces de type ST-SN, ERO, DE CET ST-FA sur lesquelles le développement des croûtes d'érosion, de décantation et biologiques connues pour leur faibles capacité d'infiltration a été observé.

Les résultats du suivi des paramètres de rendement du niébé ont révélé que l'HSS a une influence sur la nodulation et les rendements en fanes et en grains des différentes variétés de niébé dans les champs agricoles. On retient globalement que la nodulation du niébé est plus importante sur les EHS ST-F et ST-FA par rapport aux autres EHS. En revanche, elle est plus faible par ordre d'importance sur les EHS ERO et ST-SN. Les rendements en fanes et en grains quels que soient la variété de niébé ou le site considérés sont toujours plus importants sur les EHS ST-F et ST-FA et dépassent ceux obtenus en milieu paysan au Niger (400 kg/ha pour les fanes et 120 kg/ha pour les grains). Les rendements les plus faibles

concernent les surfaces ERO et ST-SN et mais aussi l'ESH DEC-AL-FA (à cause du développement anarchique des adventices sous la canopée de *Faidherbia albida*).

Ce travail a montré que l'effet l'apport de fumier a un effet significatif sur la qualité des sols et les rendements du niébé sur les EHS dites à contraintes (ERO, ST-SN et DEC-AL). L'application du fumier sur les EHS à contraintes apparait comme étant une alternative très efficace pour améliorer la qualité des sols et la production des cultures. A cet effet, les résultats ont relevé que les teneurs en C, P, N, la CEC, les bases échangeables et les valeurs de pH ont significativement augmentées sur les surfaces ERO + Fumier, ST-SN + Fumier et DE-AL + Fumier par rapport à leurs témoins (ERO, ST-SN et DEC-AL). On note également l'amélioration des propriétés hydrodynamiques sur les surfaces fumées par rapport à leurs témoins. En ce qui concerne les paramètres de rendements, l'application du fumier a permis de d'augmenter fortement le nombre de nodules formés ainsi que les rendements en fanes et en grains ont drastiquement augmenté sur les EHS a contraintes après application du fumier. Le nombre de nodules et les rendements observés sur les EHS fumées sont plus importants que ceux obtenus sur toutes les EHS quel que soit le site.

Les résultats de cette étude pourront permettre une meilleure prise en compte de l'hétérogénéité de surface du sol dans la recherche des solutions pour optimiser la production du niébé sur les sols sahéliens avec de fortes hétérogénéités de surface.

Perspectives

Il serait intéressant de :

- élargir l'étude de l'hétérogénéité de surface du sol sur les autres cultures et sur d'autres formes d'hétérogénéité de surface dans d'autres terroirs nigériens ;
- évaluer l'influence de l'hétérogénéité de surface du sol sur la microfaune (les Rhizobiums en occurrence) pour établir l'effet induit sur la nodulation et la production du niébé ;
- étudier l'effet des autres pratiques paysannes comme le compostage sur la nodulation et la production du niébé sur les EHS à contraintes ;
- évaluer l'effet du stress hydrique du niébé en fonction de l'hétérogénéité de surface du sol ;

- faire une étude comparative de l'hétérogénéité de surface du sol en fonction des champs de case et des champs de brousse (dans le cadre de cette étude, l'hétérogénéité étudiée, concerne les champs de case) ou en fonction des unités morpho-pédologiques ;
- prospecter des stratégies de gestion des fourmilières pour optimiser l'impact de leurs services écosystémiques.

BIBLIOGRAPHIE

Abdou S. (2015). Caractérisation des propriétés hydrodynamiques des sols à l'échelle ponctuelle en zones cristalline et sédimentaire de l'ouest du Niger. Mémoire de master 2 Département de Géographie, Faculté des lettres et des sciences humaines, Université Abdou Moumouni de Niamey, Niger.P.69.

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.

Abdoul Karim, T. D., Sanoussi, A. T. T. A., Maarouhi, I. M., Falalou, H et Bakasso Y. (2018). Effect of water deficit at different stages of development on the yield components of cowpea (*Vigna unguiculata* L. Walp) genotypes. African journal of biotechnology, 17(9), 279-287.

Abdourhamane Touré A. (2011). Erosion en milieu sableux cultivé au Niger : Dynamique actuelle et recente en liaison avec la pression anthropique et les changements climatiques. Thèse de Doctorat, Université de Bourgogne, P.224.

Abdourhamane Touré, A., Guillon, R., Garba, Z., Rajot, J. L., Petit, C., Bichet, V., et Sebag, D. (2010). Evolution des paysages Sahélines au cours des six dernières décennies dans la région de Niamey: de la disparition de la brousse tigrée à l'encroutement de surface des sols. Sahelian landscape evolution during the six last decades in the Niiamey vicinity: from the tiger bush disappearing to the soil crusting. Pangea, 47, 35-40.

Abdourhamane Touré, A., Rajot J.-L, Garba Z., Guillon R, Didier T. A, Marticorena. B. Petit C, 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.

Abdourhamane Touré, A., Tidjani, A. D., Rajot, J. L., Bouet, C., Garba, Z., Marticorena, B., et Ambouta, K. J. M. (2017). Impacts de la variabilité spatiale de l'occupation des sols sur l'érosion éolienne et les transports de nutriments dans le terroir de Banizoumbou (sud-ouest du Niger). Algerian journal of arid environment, 7(2), 52-62.

Aboubacar. K ; Ousmane. Z. M ; Amadou. H .I ; Issaka. S ; Mayaki. A. (2013). Effet de la co-inoculation du rhizobium et de mycorhizes sur les performances agronomiques du

niébé [*Vignaunguiculata* (L.) Walp.] au Niger. Journal of Applied Biosciences 72:5846-5854.

Abril, A., Villagra, P., et Noe, L., (2009). Spatiotemporal heterogeneity of soil fertility in the Central Monte desert (Argentina). J. Arid Environ. 73, 901-906.

Adamou S., Maman M., Biga A., Mamadou G. (2012). Rapport de la collecte de données sur la recherche participative sur les acquisitions massives de terres agricoles en Afrique de l'Ouest: cas du Niger. Coalition pour la Protection du Patrimoine Génétique Africain COPAGEN Niger, 44p.

Adejuwon, J. O. (2005). Food crop production in Nigeria. Present effects of climate variability. Climate Research, 30(1), 53-60.

Affokpon, A., Djènontin, J. A. P., Zoffoun, A. G., Allagbé, M. C., Akondé, T. P., Aïhou, K., et Mensah, G. A. (2013). Effets des variétés de niébé à buts multiples comme précédent cultural sur le rendement du maïs cultivé sur terres de barre dégradées au Sud-Bénin. Bulletin de recherche agronomique du Bénin, (1), 58-68.

Agbede, T. M., Ojeniyi, S. O., & Adeyemo, A. J. (2008). Effect of poultry manure on soil physical and chemical properties, growth and grain yield of sorghum in southwest, Nigeria. American-Eurasian journal of sustainable agriculture, 2(1), 72-77.

Akpo, M. A., Saïdou, A., Yabi, I., Balogoun, I., et Bio Bigou, B. L. (2016). Indicateurs paysans d'appréciation de la qualité des sols dans le bassin de l'Okpara au Bénin. Etude et Gestion des Sols, 23, 53-65.

Albergel J. et Valentin C., (1991). Sahélisation d'un petit bassin versant soudanien Kognere-Boulsa, au Burkina Faso. Dakar : Presse Universitaire de Dakar.

Albergel.J, casenave.A, ribstein.P, valentin. C. (1992). Aridité climatique, aridité édaphique : étude des conditions de l'infiltrabilité en Afrique tropicale sèche. ORSTOM Éditions, 1992, 123-130.

Alene, A. D., et Manyong, V. M. (2006). Farmer-to-farmer technology diffusion and yield variation among adopters: the case of improved cowpea in northern Nigeria. Agricultural Economics, 35(2), 203-211.

Alexandre D. Y., (1983). Pour une unité de recherche en Agroforesterie à l'ORSTON. Cayenne, ORSTOM, P.19.

Ali Bene et Anne Fournier (2014). Végétation naturelle et occupation des terres au Burkina Faso (Afrique de l'ouest). Cinq décennies de changement dans un terroir du pays sèmè. Actes du Colloque international d'Ouagadougou (8-10 mars 2012), Sciencesconf.org, pp.143-164, 2014.

Ali, A., Lebel, T., (2009). The Sahelian standardized rainfall index revisited. International Journal of Climatology 29, 1705–1714.

Alzouma I., (1987). Reproduction et développement de *B. atrolineatus Pic* au dépens des cultures de V. *unguiculata* L. Walp (Leguminosae : Papilionacae) dans un agro système Sahélien au Niger. Thèse de doctorat, Université F. Rabelais de Tours : 162p.

Ambouta J.M.K (1994). Etude des facteurs de formation d'une croûte d'érosion et de ses relations avec les propriétés internes d'un sol sableux fin au Sahel. Thèse Ph-D, Université Laval, p.97.

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

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

Ambouta, J. M. K (1997). Définition et caractérisation des structures de végétation contractée au Sahel : cas de la brousse tigrée nigérien. In D'Herbes, J. M. et al. 1999, Fonctionnement et gestion des écosystèmes contractés sahéliens, John Libbey Eurotext, Paris, pp 41-57.

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. and Yayé, A. D., 2007- Vulnérabilité et innovations paysannes: l"expérience d"Aguié au Niger. Louvain-la-Neuve, Belgique, Presses universitaires de Louvain, 114 pages.

Annou, G. M. (2002). Les grands types de sols du Niger. http://agris.fao.org/agris-search/search.do?recordID=XF2016018331. Consulté le 24/08/2018

Anthelme, F., Mato, M. W., Boissieu, D. D., et Giazzi, F. (2006). Dégradation des ressources végétales au contact des activités humaines et perspectives de conservation dans le

massif de l'Aïr (Sahara, Niger). VertigO-la revue électronique en sciences de l'environnement, 7(2).

Aranyos, J.T., Tomócsik, A., Makádi, M., Mészáros, J., Blaskó, L., (2016). Changes in physical properties of sandy soil after long-term compost treatment. International agrophysics 30, 269–274.

Armand, R., (2009). Étude des états de surface du sol et de leur dynamique pour différentes pratiques de travail du sol : mise au point d'un indicateur de ruissellement. Thèses de doctorat, Université de Strasbourg.P.209.

Asseline, J., Mtimet, A., Pontanier, R., Clery, J., (1987). Une méthode de caractérisation, en zone aride et semi aride, des états de surfaces élémentaires (1m²) soumis à des averses contrôlées. Gouttes et Splash, vol. 4(1): 13 18.

Auzet, A.V., Boiffin, J., Papy, F., Maucorps, J., Ouvry, J.F., (1990). An approach to the assessment of erosion forms and erosion risk on agricultural land in the northern Paris Basin, France. J.Boardman, I.D.L. Foster and J.A. Dearing (Eds.), Soil Erosion on agricultural land. Wiley: 383 400.

Awaiss A., 1996. Les ressources ligneuses et leurs exploitations comme bois de feu et de service à Mayahi ; rapport de synthèse. P.25.

Awaiss, A. ; Illia, M. H. ; Soumana, I. et Amoukou, I. A. (1996): Les ressources ligneuses et leur exploitation comme bois de feu et de service à Mayahi (Niger), in Gestion des terroirs et ressources naturelles au Sahel, Actes du séminaire, Montpellier : CNEARC, 2-3 avril 1996, pp 28-33.

Awe, G.O., Reichert, J.M., Timm, L.C., Wendroth, O.O., (2015). Temporal processes of soil water status in a sugarcane field under residue management. Plant and soil 387, 395–411.

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 de l'Université de Laval Québec. P.183.

Bado, B. V., Bationo, A., et Cescas, 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.

Bado, B. V., Sédogo, M. P., Cescas, M. P., Lompo, F., et Bationo, A. (1997). Effet à long terme des fumures sur le sol et les rendements du maïs au Burkina Faso. Cahiers Agricultures, 6(6), 571-575.

Bagayoko, M., Buerkert, A., Lung, G., Bationo, A., et Römheld, 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.

Baggnian, I., Adam, T., Adamou, M. M., Chaibou, I., et Mahamane, A. (2014). Structure et dynamique de la végétation ligneuse juvénile issue de la régénération naturelle assistée (RNA) dans le Centre-Sud du Niger. International Journal of Biological and Chemical Sciences, 8(2), 649-665.

Bai, Y., et Wang, Y. (2011). Spatial variability of soil chemical properties in a Jujube slope on the Loess Plateau of China. Soil Science, 176(10), 550-558.

Bal A.B., Sarr E. et N'Diaye M., (2003). Gestion intégrée des légumineuses et autres cultures industrielles (Arachide, Niébé, Cotonnier, Canne à sucre et sésame. CRA/DFR, Niamey, 128p

Ballocca, A., et Piémont, C. S. I., 2004. Étude prospective afin d'évaluer les tendances des secteurs LCD–GRN Régions De Tillabéry Et De Maradi (Niger) À L'horizon 2025.

Banoin M., Gueye C., Soumana I., Ali M., Jouve P. (1996): Péjorations climatiques et évolution des pratiques de transhumance en zone agropastorale sahélienne, cas de l'arrondissement de Mayahi, P.21.

Baoua, I., Nouri, M., Saidou, A.K., Amadou, L. (2013). Quelques nouvelles variétés du niébé précoces productives et résistantes aux ravageurs. Centre régional de la Recherche Agronomique du Niger (CERRA). P.2.

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

Bationo, A. (2000). Rotation and nitrogen fertilizer effects on pearl millet, cowpea and groundnut yield and soil chemical properties in a sandy soil in the semi-arid tropics, West Africa. Cambridge University The Journal of Agricultural Science/ Volume 134 / Issue 03 / mai 2000, 277 – 284

Bationo, A., Kihara, J., Vanlauwe, B., Waswa, B., Kimetu, J., (2007). Soil organic carbon dynamics, functions and management in West African agro-ecosystems. Agricultural Systems, Making Carbon Sequestration Work for Africa's Rural Poor 94, 13–25. https://doi.org/10.1016/j.agsy.2005.08.011

Bationo, A., Kimetu, J., Ikerra, S., Kimani, S., Mugendi, D., Odendo, M., Silver, M., Swift, M.J., Sanginga, N., (2004). The African network for soil biology and fertility: new challenges and opportunities. Managing nutrient cycles to sustain soil fertility in Sub-Saharan Africa 1–23.

Bationo, André, and A. U. Mokwunye. (1991). Role of manures and crop residue in alleviating soil fertility constraints to crop production: With special reference to the Sahelian and Sudanian zones of West Africa. Fertilizer research, 29(1), 117-125.

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 semiarides de l'Afrique de l'Ouest : Aperçu de quelques systèmes candidats. ICRAF Technical Manual no. 17 Nairobi : World Agroforestry Centre.

Baumer M., (1997). L'agroforesterie pour les productions animales, CTA/ICRAF, Wageningen, Pays-Bas, P.340.

Bautista, F., et 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.

Begue A, Vintrou E, Ruelland D, Cladern M, Dessay N, (2011). Can a 25-year trend in Soudano-Sahelian vegetation dynamics be interpreted in terms of land use change? A remote sensing approach. Global Environmental Change 21 : 413-20.

Bellefontaine, R., Nicolini, E.A., et Petit, S. (1999). Réduction de l'érosion par l'exploitation de l'aptitude à drageonner de certains ligneux des zones tropicales. Cirad-Forêt,Cedex France. P342-352.

Belnap J et Lange O. (2001). Biological Soil Crusts: Structure, Function, and Management, Ecological Studies Series. Springer-Verlag, Berlin.150 p

Belnap J. (2005). Encyclopedia of Soils in the Environment. D. Hillel, editor. London, Elsevier, Crusts Biological, pp: 339-346.

Bene J. G., Beall H. W. et Côté A., (1977). Trees, food and people. Land management in the tropics. Editeurs : IDRC, Ottawa, ON, CA, P.52.

BENOÎT, M., Chevallier, T., GOBRECHT, A., GORRETTA, N., ROGER, J. M., et Barthès, B. (2012). Micro-hétérogénéité spatiale de la fonction de respiration du sol; effet d'un stress thermique. 11èmes journées d'Etude des Sols, 428.

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

Bielders, C.L., Michels, K., 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, 216–222. https://doi.org/10.1111/j.1475-2743.2002.tb00242.x

Bielders, C.L., Michels, K., Rajot, J.-L., (2000). On-Farm Evaluation of Ridging and Residue Management Practices to Reduce Wind Erosion in Niger. Soil Science Society of America Journal 64, 1776–1785. https://doi.org/10.2136/sssaj2000.6451776x

Bilgo. A., Hien V., Serpantie. G, Masse.D, Chotte J.L., Fournier.J., Zaonero. P. (2001). Matière organique et éléments minéraux déplacés par l'érosion hydrique sur des parcelles cultivées, en jachère, ou mixtes en savane soudanienne (Burkina Faso). P.208-222.

Bio-Lafia S., (2007). Appréciation de la qualité des sols à travers la diversité des pratiques culturales cas du village de Gounin, Commune de N'Dali. Mémoire pour l'obtention du Diplôme d'Ingénieur des Travaux (DIT), Ecole Polytechnique d'Abomey-Calavi, Bénin. 45 p

Blade, S. F., Mather, D. E., Singh, B. B., et Smith, D. L. (1991). Evaluation of yield stability of cowpea under sole and intercrop management in Nigeria. Euphytica, 61(3), 193-201.

Blanchard M., Coulibaly. K., Bognini. S., Dugué. P., Vall. E. (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 2014 18(4), 512-523.

Blanchart, E., Albrecht, A., Alegre, J., Duboisset, A., Gilot, C., Pashanasi, B., ... et Brussaard, L. (1999). Effects of earthworms on soil structure and physical properties. Earthworm management in tropical agroecosystems, 5, 149-171.

Boffa JM, (2000). Les parcs agroforestiers en Afrique subsaharienne, Cahier FAO, Conservation N° 34, Rome, 259 p.

Boiffin, J., (1984). La dégradation structurale des couches superficielles du sol sous l'action des pluies. Thèse de doctorat, Sciences agronomiques, INA Paris Grignon.

Bonnecase, V., (2010). Retour sur la famine au Sahel du début des années 1970 : la construction d'un savoir de crise. Politique africaine N° 119, 23–42.

Boubacar A, (2006). Effet du niveau d'élagage et de la distance du pied d'Acacia senegal (L.) Willd sur la production du mil Pennisetum glaucum (L.) R.Br. en station. Mémoire d'Ingénieur des Techniques Agricoles, Faculté d'Agronomie, Université Abdou Moumouni de Niamey, P.41.

Boubacar Hassane, A. (2010). Acquifères superficiels et profonds et pollution urbaine en Afrique : cas de la communauté urbaine de Niamey (Niger). Université Abdou Moumouni de Niamey, Niamey-Niger. Charrier, A., Michel J., Harnon T., et Nicolas D., 1997. L'amélioration des plantes tropicales, CIRAD/ORSTOM Pt 483 - 503.

Boubacar, M. M., Innoussa, M. M., Ambouta, J. K., Mahamane, A., Jorgen, A. A., Harissou, Y., et Rabiou, H. (2013). Caractérisation de la végétation ligneuse et des organisations pelliculaires de surface des agroécosystèmes à différents stades de dégradation de la Commune rurale de Simiri (Niger). International Journal of Biological and Chemical Sciences, 7(5), 1963-1975.

Boureima, A. (2004). Patrimoine communautaire et conflits d'usage dans deux villages du Zarmaganda au Niger/Communuty patrimony and usage conflicts in two villages of Zarmaganda in Niger. Revue de géographie alpine, 92(1), 83-96.

Bourrié, G. (Ed.), (2018). Soils as a key component of the critical zone 3 : soils and water circulation, Geosciences Series. Soils Set. ISTE, Londres.

Boutraa, T., et Sanders, F. E. (2001). Influence of water stress on grain yield and vegetative growth of two cultivars of bean (Phaseolus vulgaris L.). Journal of Agronomy and Crop Science, 187(4), 251-257.

Bouzou Moussa I et Yamba B, (2016).Savoirs locaux et gestion des écosystèmes sahéliens, Les Cahiers d'Outre-Mer [En ligne], 241-242 | Janvier-Juin 2008, mis en ligne le 01 janvier 2011, consulté le 30 septembre 2016. URL : http://com.revues.org/3762 ; DOI : 10.4000/com.3762

Bouzou Moussa I, Descroix L, Faran Maiga O, Gautier E, Moustapha Adamou M, Esteves M, Souley Y_ero K, Malam Abdou M, Mamadou I, Le Breton E, Abba B, (2011). Les changements d'usage des sols et leurs conséquences hydro géomorphologiques sur un bassin versant endoréique sahélien. Sècheresse 22 : 13-24. doi : 10.1684/sec.2011.0297

Bouzou Moussa I., Maiga, O. F., Ambouta, J. M. K., Sarr, B., Descroix, L., et Adamou, M. M. (2009). Les conséquences géomorphologiques de l'occupation du sol et des changements climatiques dans un bassin-versant rural sahélien. Science et changements planétaires/Sécheresse, 20(1), 145-152.

Brauman, A. (2000). Effect of gut transit and mound deposit on soil organic matter transformations in the soil feeding termite: a review. European Journal of Soil Biology, 36(3-4), 117-125.

Breman, H., et Kessler, J. J. (1997). The potential benefits of agroforestry in the Sahel and other semi-arid regions. European Journal of Agronomy, 7(1-3), 25-33.

Breman, H., Groot, J.R., van Keulen, H., (2001). Resource limitations in Sahelian agriculture. Global Environmental Change 11, 59–68.

Brouwer J., Fussell L. K, et 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., (2008). Within-field soil and crop growth variability. The Netherlands, Through Wageningen Agricultural University. P.9.

Brouwer, J., Buerkert, A.C., Stern, R.D., Vandenbeldt, R.J., Powell, J.M., (1993). Soil and crop growth micro-variability in the Sahel: boon or bane for farmers and agronomists? In: Kronen, M. (Ed.), Proceedings of the Third Annual Conference of the SADC-Land and Water Management Conference, 5-7 October 1992, Harare, Zimbabwe. SADC-Land and Water Management Research Programme, Gabarone, Botswana, pp. 167-176.

Brouwer, J., et 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), 22-26 Nov 1993. ILCA.

Brouwer, J., Geiger, S. C., & Vandenbeldt, R. J. (1992). Variability in the growth of *Faidherbia albida*: a termite connection. *Faidherbia albida* in the West African Semi-arid Tropics, 131-138.

Buerkert, A., Lamers, J.P.A., Schmelzer, G.H., Becker, K., Marschner, H., (1997). Phosphorus and millet crop residue application affect the quantity and quality of millet leaves and fodder weeds for ruminants in agro-pastoral systems of the sahel. Experimental Agriculture 33, 253–263.

Burke, I. C., Lauenroth, W. K., Riggle, R., Brannen, P., Madigan, B., et Beard, S. (1999). Spatial variability of soil properties in the shortgrass steppe: the relative importance of topography, grazing, microsite, and plant species in controlling spatial patterns. Ecosystems, 2(5), 422-438.

Cao, C., Jiang, S., Ying, Z., Zhang, F., et Han, X. (2011). Spatial variability of soil nutrients and microbiological properties after the establishment of leguminous shrub Caragana microphylla Lam. plantation on sand dune in the Horqin Sandy Land of Northeast China. Ecological Engineering, 37(10), 1467-1475.

Casenave, A. and Valentin, C., (1992). A runoff capability classification system based on surface features criteria in semi-arid areas of West Africa. J. Hydrol., 130: 231-249.

Casenave, A., et Valentin, C. (1989). Les états de surface de la zone sahélienne : Influence sur l'infiltration. Editions de l'ORSTOM, Paris, P.229.

CESAO-PRN, (2009) : étude de référence sur la filière niébé dans la région de Zinder (SNV Zinder)/(CESAO-PRN) Antenne de Maradi, p. 80.

Charlier, S., Diop Sall, F., et Lopez, G. (2014). Les modes de gouvernance foncière au prisme d'une approche genre. Études de cas au Niger, au Sénégal et en Bolivie. Féminin-masculin, genre et agriculture familiale, 29-54.

Chebbani R, Djilli K, Roose E. (1999). Etude à différentes échelles des risques d'érosion dans le bassin versant de l'Isser. Bulletin ORSTOM, Erosion érosion, P. 85-95.

Christianson, C. B., Bationo, A., et Baethgen, W. E. (1990). The effect of soil tillage and fertilizer use on pearl millet yields in Niger. Plant and Soil, 123(1), 51-58.

Cissé, S. (2016). Etude de la variabilité intra saisonnière des précipitations au Sahel: impacts sur la végétation (cas du Ferlo au Sénégal) (Doctoral dissertation, Université Pierre et Marie Curie-Paris VI).

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. p.156.

Copec K., Filipovic D., Husnjak S., Kovacev I., Kosutic S. (2015): Effects of tillage systems on soil water content and yield in maize and winter wheat production. Plant Soil Environ., 61: 213-219.

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.

Cunningham, P. J., et Abasse, T. (2005). Reforesting the Sahel: farmer managed natural regeneration. Domestications des especes agroforestieres au sahel: situation actuelle et perspectives. ICRAF Working Paper, 5, 75-80.

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), p. 95-114.

Dabre, A., Hien, E., Some, D., et Drevon, J. J., (2016). Impacts des pratiques culturales sur la production du sorgho (*Sorghum bicolor* L.) et du niébé (*Vigna unguiculata* (L.) Walp.) et sur le bilan partiel de l'azote sous niébé au Burkina Faso. International Journal of Biological and Chemical Sciences, 10(5), 2215-2230.

Dachung, G., Verinumbe, I., et Ayuba, S. A. (2014). Effect of agroforestry trees on chemical properties of vertisols of the sahel region of borno state, Nigeria. Journal of Research in Forestry, Wildlife and Environment, 6(1), 1-7.

Dakora F.D., et Keya S.O. (1997). Contribution of Legume Nitrogen Fixation to Sustainable Agriculture in Sub-Saharan Africa", Soil Biology and Biochemistry, vol. 29, no 5-6, p. 809-817.

Dan Lamso N et Guéro Y., Tankari Dan-Badjo A., Tidjani A. D., Ado Maman N. et Ambouta J-M K., (2015a). Effet des touffes de *Guiera senegalensis* sur la production du mil dans la région de Maradi (NIiger). Revue des Bioressources, 5(2).

Dan Lamso N., Guéro Y., Tankari Dan-Badjo A., Rabah L., Bationo A.B., Patrice D., Tidjani AD., Ado Maman N. et Ambouta K.J-M., (2015b). Effet des touffes de Hyphaene thebaica (Mart) sur la production du mil dans la région de Maradi (Niger).Int. J. Biol. Chem. Sci. 9(5): 2477-2487.

Dan Lamso N., Guéro Y., Tankari Dan-Badjo A., Tidjani A. D., Ado Maman N. et Ambouta J-M K., (2015c). Effet des touffes de Guiera senegalensis (J.F. Gmel) sur la fertilité des sols dans la région de Maradi (Niger); Journal of Applied Biosciences 94:8844-8857.

Das, T., et Das, A. K. (2005). Local soil knowledge of smallholder rice farmers: A case study in Barak Valley, Assam. Indian Journal of Traditional Knowledge, 4(1), 94-99.

Davis, J. G., Hossner, L. R., Wilding, L. P., et Manu, A. (1995). Variability of soil chemical properties in two sandy, dunal soils of Niger. Soil science, 159(5), 321-330.

Day, J. M., Roughley, R. J., Eaglesham, A. R. J., Dye, M., et White, S. P. (1978). Effect of high soil temperatures on nodulation of cowpea, *Vigna unguiculata*. Annals of Applied Biology, 88(3), 476-481.

De Rouw, A., (1997). Gestion de la fertilité des sols pour la culture du mil au Niger. Jachère et maintien de la fertilité, 77.

Depommier D, Janodet E et Oliver R., (1992). *Faidherbia albida* parks and their influence on soils and crops at Watinoma, Burkina Faso. In: Vandenbeldt RJ (ed) *Faidherbia albida* in the West African semi-arid tropics: proceedings of a workshop, 22-26 April 1991, Niamey, Niger, pp 111-115.

Deprince, A., (2003). La faune du sol. Diversité, méthodes d'étude, fonctions et perspectives. Le Courrier de l'environnement de l'INRA, 49(49), 123-138.

Descroix, L., Diedhiou, A., (2013). État des sols et évolution dans un contexte de changements climatiques, in: Dia, A., Duponnois, R. (Eds.), La Grande Muraille Verte : Capitalisation Des Recherches et Valorisation Des Savoirs Locaux, Hors Collection. IRD Éditions, Marseille, pp. 161–198.

Descroix, L., Esteves, M., Souley Yéro, K., Rajot, J. L., Malam Abdou, M., Boubkraoui, S., et Bachir, A. (2011). Runoff evolution according to land use change in a small Sahelian catchment. Hydrology and Earth System Sciences Discussions, (1), 1569-1607.

Descroix, L., Mamadou, I., Abdou, M. M., Bachir, A., Moussa, I. B., Le Breton, E., et Yéro, K. S. (2007). Etat des lieux et proposition de restauration des sols sur le Bassin versant de Tondi Kiboro (Niger).

Descroix, L., Viramontes, D., Vauclin, M., Gonzales Barrios, J.L., Esteves, M., (2000). Influence of soils surface features and vegetation on runoff and erosion in the Western Sierra Madre (Durango, Nortwest Mexico). Catena, vol. 43: 115 135.

Diacono, M., Rubino, P., Montemurro, F., (2013). Precision nitrogen management of wheat. A review. Agron. Sustain. Dev. 33, 219–241. https://doi.org/10.1007/s13593-012-0111-z

Diallo B., Traoré A., Dembélé. N., Staatz. J., (2012). Les perspectives d'échanges et la promotion des chaines de valeurs agricoles en Afrique de l'Ouest (campagne 2012-13). Strengthening Regional Agricultural Integration in West Africa, Résultats de recherche n° 2012-12, P.4.

Diarisso, T., Corbeels, M., Andrieu, N., Djamen, P., Douzet, J. M., et Tittonell, P. (2016). Soil variability and crop yield gaps in two village landscapes of Burkina Faso. Nutrient cycling in agroecosystems, 105(3), 199-216.

Diedhou, I., Sene, M., Dick, R. P., (2009). Decomposition and spatial microbial heterogeneity associated with native shrubs in soils of agroecosystems in semiarid Senegal. Pedobiologia, 52: 273-286.

Diop I., Kane. A., Wade. T. K., Sanon. K.B., Houngnandan. P., Neyra. M., 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 *Rhizophagus irregularis*. Journal of Applied Biosciences 69:5465 – 5474

Dixon, R.O. D. et Wheeler C. T., (1996). Nitrogen fixation in plants. Backie. Glasgow. 152p.

Djenontin, J. A., Wennink, B., Dagbenongbakin, G., et Ouinkoun, G., (2003). Pratiques de gestion de fertilité dans les exploitations agricoles du Nord-Bénin. In Savanes africaines: des espaces en mutation, des acteurs face à de nouveaux défis. Actes du colloque, Garoua, Cameroun (pp. 9-p). Cirad-Prasac.

Dominique L., N'Dour B., et N'Diaye S.A. (1992). Influence de *Faidherbia albida* sur l'arachide et le mil au Sénégal. Méthodologie de mesure et estimations des effets d'arbres émondés avec ou sans parcage d'animaux. Cahier scientifique n°12. P123-139.

Domisch, T., Ohashi, M., Finér, L., Risch, A. C., Sundström, L., Kilpeläinen, J., et Niemelä, P. (2008). Decomposition of organic matter and nutrient mineralisation in wood ant (Formica rufa group) mounds in boreal coniferous forests of different age. Biology and Fertility of soils, 44(3), 539-545.

Donfack, P., et Seignobos, C. (1996). Des plantes indicatrices dans un agrosystème incluant la jachère: les exemples des Peuls et des Giziga du Nord-Cameroun. Journal d'Agriculture traditionnelle et de Botanique Appliquée, 38(1), 231-250.

Dostál, P., Březnová, M., Kozlíčková, V., Herbena, T. et Kovář, P. (2005) Ant-induced soil modification and its effect on plant below-ground biomass. Pedobiologia, 49, 127-137.

Doumma A., (2011). Influence de deux alternatives de lutte sur les capacités de reproductrices de Callosobruchus maculatus FAB (Coleoptera-Bruchidae), Ravageur du niébé. Thèse de doctorat, Université Abdou Moumouni-Niger ; P.159.

Doumma A., Salissou O., Sembène M. Sidikou R.S.D. , Sanon A., Ketoh G.K.,Glitho I.A. (2011). Etude de l'activité reproductrice de Callosobruchus maculatus (F.)(Coleoptera : Bruchidae) sur dix variétés de niébé, *Vigna unguiculata* (L.) Walp. en présence ou non de son parasitoïde, *Dinarmus basalis* R. (Hymenoptera : Pteromalidae). Journal of Animal et Plant Sciences, 2011. Vol. 11, Issue 2: 1398-1408.

Douzals, J. P. (2000). Mesures physiques de la variabilité des sols en agriculture de précision. Ingénieries-EAT, (24), p-45.

Duchaufour, P., Faivre, P., Poulenard, J., Houot, S., et Gury, M. (2018). Introduction à la science du sol-7e éd.: Sol, végétation, environnement. Dunod.

Duflot, R. (2013). Hétérogénéité fonctionnelle et biodiversité: quel est le rôle des interfaces ou lisières dans les paysages agricoles? (Doctoral dissertation, Université Rennes 1).

Dufrene M. et Legendre P., (1997). Species Assemblages and Indicator Species: The Need for a Flexible Asymmetrical Approch. Ecol. Monogr., 67, 3, 345-366.

Dugje. Y; Omoigui. O; Ekeleme. F; Kamara. Y; Ajeigbe. H. (2009). Production du niébé en Afrique de l'Ouest: Guide du paysan;IITA.P.20.

Dupuis J et Verger F, (1964). Les microreliefs dus aux fourmis et leurs caractères pédologiques Norois, 41 (1964), pp. 5-15

Dutordoir, C. D. (2006). Impact de pratiques de gestion de la fertilité sur les rendements en mil dans le Fakara (Niger). Travail de fin d'études présenté en vue de l'obtention du grade de bio-ingénieur.

Escadafal R., (1989). Caractérisation de la surface des sols arides par observations de terrain et par télédétection. Applications : exemple de la région de Tataouine (Tunisie). Etudes et Thèses. Edition ORSTOM, Paris. P.318.

Esteves, M. et Lapetite, J. M. (2003) A multi-scale approach of runoff generation in a Sahelian gully catchment: a case study in Niger. CATENA 50(2–4), 255–271.

Ettema, C. H., et Wardle, D. A. (2002). Spatial soil ecology. Trends in ecology et evolution, 17(4), 177-183.

FAO, (1998). FAOSTATS-statistics Database. http://apps.fao.org, consulté le 11 Mars 2018.

FAO, (2014). Etude sur la sécurité semencière au Niger. Rapport d'étude pilote dans les communes rurales de Dantchiandou, Imanan et Kourthèye (région de Tillabéri). P.38.

FAO, (2015). Status of the World's Soil Resources, rapport principal, Rome, disponible à l'adresse : http://www.fao.org/3/a-i5199e.pdf. Consulté le 22 Mars 2019

FAO, (2018). URL https://www.iaea.org/fr/themes/lutte-contre-lerosion-des-sols (accessed 3.22.19).

FAOSTAT (2004). Agricultural production, crop primary database.bFood and Agricultural Organisation of the United Nations, Rome. http://faostat.fao.org/faostat/

Farji-Brener, A. G., et 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.

Fatokun, C.A., S.A. Tarawali, B.B. Singh, P.M. Kormawa, and M. Tamò (editors). (2002). Challenges and opportunities for enhancing sustainable cowpea production. Proceedings of the World Cowpea Conference III held at the International Institute of Tropical Agriculture (IITA), Ibadan, Nigeria, 4–8 September 2000. IITA, Ibadan, Nigeria.

Feller C., Lavelle P., Albrecht A., Nicolardot B. (1993). La jachère et le fonctionnement des sols tropicaux : Rôle de l'activité biologique et des matières organiques. ORSTOM, CEDEX, P.16-32.

Fening, J. O., & Danso, S. K. A. (2002). Variation in symbiotic effectiveness of cowpea bradyrhizobia indigenous to Ghanaian soils. Applied Soil Ecology, 21(1), 23-29.

Florinsky, V., Eilers, R.G. et Lelyk, G.W. (2000) Prediction of soil salinity risk by digital terrain modelling in Canadian prairies. Can. J. So/ Sci. 80: 455-463

Folefack D.P. , Sobda A.G., Tengomo S., Boukar O. et Tahirou A. (2013). Vulgarisation de la méthode du triple ensachage pour le stockage amélioré du niébé en zone sahélienne du Nord Cameroun: Enjeux et perceptions paysannes. TROPICULTURA, 2013, 31, 3, 170-178

Folgarait, P.J., (1998). Ant biodiversity and its relationship to ecosystem functioning: a review. Biodiv. Conserv. 7, 1221-1244.

Gajda, A.M., Czyż, E.A., Dexter, A.R., (2016). Effects of long-term use of different farming systems on some physical, chemical and microbiological parameters of soil quality. International Agrophysics 30, 165–172. https://doi.org/10.1515/intag-2015-0081

Ganaba S. (2005). Impact des aménagements de conservation des eaux et des sols sur la régénération des ressources ligneuses en région sahélienne et nord soudanienne du Burkina Faso. Vertigo-La revue en sciences de l'environnement, Vol6 no2, P.15.

Gandah, M., J. Bouma, J. Brouwer, P. Hiernaux, and N. Van Duivenbooden. (2003a). Strategies to Optimize Allocation of Limited Nutrients to Sandy Soils of the Sahel: A Case Study from Niger, West Africa. Agriculture, Ecosystems & Environment 94: 311–19.

Gandah, M., J. Brouwer, P. Hiernaux, and N. Van Duivenbooden. (2003)b. Fertility Management and Landscape Position: Farmers' Use of Nutrient Sources in Western Niger and Possible Improvements. Nutrient Cycling in Agroecosystems 67: 55–66.

Gandah, M., Stein, A., Brouwer, J., et 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.

Gandah, M. (1999). Spatial variability and farmer resource allocation in millet production in Niger. Thesis,

Garba A., (2007). Etude des possibilités d'amélioration de système de production à base des légumineuses alimentaires (niébé-arachide) dans la zone agro écologique du Fakara, Sud-Ouest du Niger. Mémoire DES en Gestion des Ressources Animales et Végétales

en milieux tropicaux. Faculté des Sciences Agronomiques de Gembloux, Université de Liège. 72p.

Garrigues, S., (2004). Hétérogénéité spatiale des surfaces terrestres en télédétection : caractérisation et influence sur l'estimation des variables biophysiques, Ecole Nationale Supérieure Agronomique de Rennes, Avignon.

Geiger, S. C., et Manu, A. (1993). Soil surface characteristics and variability in the growth of millet in the plateau and valley region of Western Niger. Agriculture, ecosystems et environment, 45(3-4), 203-211.

Geiger, S. C., Manu, A., et Vandenbeldt, R. J. (1994). Variability in the growth of *Faidherbia albida*: the soils connection. Soil Science Society of America Journal, 58(1), 227-231.

Gigou, J., Traoré, K., Giraudy, F., Coulibaly, H., Sogoba, B., & Doumbia, M. (2006). Aménagement paysan des terres et réduction du ruissellement dans les savanes africaines. Cahiers Agricultures, 15(1), 116-122.

Gillet, H. (1967). Essai d'évaluation de la biomasse végétale en zone sahélienne (végétation annuelle). Journal d'agriculture traditionnelle et de botanique appliquée, 14(4), 123-158.

Gomgnimbou A.P.K, Kalifa C.W.S, Abdramane S, Nacro B, and Sedogo M. P.(2017). Évaluation des composantes de rendements et de la teneur en éléments chimiques de la biomasse du niébé (*Vigna unguiculata* L. Walp) en conditions d'expérimentation paysanne dans l'Ouest du Burkina." Afrique science 13.5 (2017): 61-69.

Greigert J et Pougnet R, (1967). Essai de description des formations géologiques de la République du Niger. Mém. BRGM 48. Paris, 239 p.

Greigert J. (1966). Description des formations crétacées et tertiaires du bassin des Iullemmeden (Afrique Occidentale). Direction des mines et la Géologie de la République du Niger, publ. no 2. BRGM, Paris, 237 p.+c. à l/l 000 000. .

Greigert, J. et Pougnet, R. (1965) Essai de description des formations géologiques de la République du Niger, BRGM. Paris.

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.

Guengant. J.P. (2011). Comment bénéficier du dividende démographique ? La démographie au centre des trajectoires de développement dans les pays de l'UEMOA : Analyse pays Niger, Agence française de développement.P55.

Guinko, S. (1997). Rôle des Acacias dans le développement rural au Burkina Faso et au Niger, Afrique de l'Ouest. Faculté des sciences et Techniques, Université de Ouagadougou Burkina Faso. FAO. P37-51.

Guo, W., Maas, SJ et Bronson, KF (2012). Relationship between cotton yield and soil electrical conductivity, topography, and Landsat imagery. Precision Agric 13: 678. https://doi.org/10.1007/s11119-012-9277-2.

Habish, H. A., et Mahdi, A. A. (1976). Effect of soil moisture on nodulation of cowpea and hyacinth bean. The Journal of Agricultural Science, 86(3), 553-560.

Hamadou Younoussa, B., Hassane Yaou ; T., Abdourhamane Touré, A., Mamoudou Jaoudar, Z., Garba, Z. (2018). Dégradation des terres et évaluation du potentiel physicochimique des terres dégradées du sud-ouest du Niger : cas des sols du terroir villageois de Boubon. Rev. Ivoir. Sci. Technol., 31 (2018) 123 – 137.

Harper, J. L., Williams, J. T., et 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, 273-286.

Herrmann SM, Anyamba A, Tucker CJ, (2005). Recent trends in vegetation dynamics in the African Sahel and their relationship to climate. Global Environmental Change 15 : 394-404.

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 : Jamin J.Y., Seiny Boukar L. & Floret C., eds. Actes du colloque Savanes africaines : des espaces en mutation, des acteurs face à de nouveaux défis, 27-31 mai 2002, Garoua, Cameroun. N'Djamena : Prasac ; Montpellier, France : Cirad.

Hien, E. (2004). Dynamique du carbone dans un Acrisol ferrique du Centre Ouest Burkina: Influence des pratiques culturales sur le stock et la qualité de la matière organique (Doctoral dissertation, École nationale supérieure agronomique (Montpellier)).

Hiernaux P. (1998).The soils in villages lands in western Niger, opportunities and constraints for rural development. Icrisat-Niamey. P.24.

Hiernaux, P., Houérou, H.N.L., (2006). Les parcours du Sahel. Science et changements planétaires / Sécheresse 17, 51–71.

Hiernaux. P., et Ayatunde. A., (2004). The Fakara: a semi-arid agro-ecosystem under stress. ILRI. P.95.

Hoffmann I., Gerling D., Kyiogwom U.B., et Mané-Bielfeldt A. (2000). Farmers' management strategies to maintain soil fertility in a remote area in northwest Nigeria. Agriculture, Ecosystems and Environment 86 (2001) 263-275.

Hole, F.D., (1981). Effects of animals on soil. Geoderma 25, 75-112.

Holt, J. A., et Lepage, M. (2000). Termites and soil properties. In Termites: evolution, sociality, symbioses, ecology (pp. 389-407). Springer, Dordrecht.

Houlès, V., (2004). Mise au point d'un outil de modulation intra parcellaire de la fertilisation azotée du blé d'hiver basé sur la télédétection et un modèle de culture,INA-PG, Paris

Hountondji, Y. C., Nicolas, J., Sokpon, N., et Ozer, P. (2005). Mise en évidence de la résilience de la végétation sahélienne par télédétection basse résolution au Niger à la suite d'épisodes de sécheresse. Belgeo. Revue belge de géographie, (4), 499-516.

Hountondji, Y. C., Ozer, P., et Nicolas, J. (2004). Mise en évidence des zones touchées par la désertification par télédétection à basse résolution au Niger. Cybergeo: European Journal of Geography.

Ingatan W. A,. (2013) Aménagements antiérosifs et écoulements dans un petit bassin versant expérimental endoréique (sud-ouest du Niger), Mémoire de master II, Département de Géographie, Faculté des lettres et des sciences humaines, Université Abdou Moumouni de Niamey, Niger. p, 93.

INS (Institut national de la statistique du Niger), 2010 - Annuaire Statistique des indépendances du Niger, spéciale 201. p.338.

INS (Institut national de la statistique du Niger), 2016 - Annuaire Statistique 2011-2015 édition 2016 - INS-Niger. p.254.

INS, (2010). Annuaire Statistique des indépendances du Niger, spéciale 201. p.338.

INS, (2016). Annuaire Statistique 2011-2015 édition 2016 - INS-Niger. p.254.

INS. (2013) Présentation des résultats préliminaires du quatrième (4ième) recensement général de la population et de l'habitat (RGP/H) 2012. Niamey-Niger.

INS-Niger, (2015).Annuaire statistique régional de Maradi. Edition 2015, République du Niger. P.158.

Islam, K. R., and Weil, R. R. (2000). Land use effects on soil quality in a tropical forest ecosystem of Bang ladesh, Agric. Ecosyst. Environ., 9, 9-16.

Issaka, M. (2001). Évolutions à long terme de la fertilité de sol dans la région de Maradi (Vol. 30). Drylands Research.

Issiaka, I. M., Boubacar, Y., et Gu, Y. (2012). Land-use and land-cover change in semi-arid zone: The case of Waro-Souloulou area in Goulbi Maradi Watershed in the Republic of Niger. Environment and Natural Resources Research, 2(1), 47.

Janeau J.L et Valentin C. (1987). Relation entre les termitières Trinervetermes s.p et la surface du sol : réorganisation, ruissellement et érosion. Rev. Ecol. Biol. Sol, 24. P.42-53.

Jemo M, Abaaidoo RC, Nolte C, Tchienkoua M, Sanginga N, Horst WJ. 2006. Phosphorus benefits from grain-legume crops to subsequent maize grown on acid soils of southern Cameroon. Plant Soi1, 284: 385-397.

Jin, J., et Jiang, C. (2002). Spatial variability of soil nutrients and site-specific nutrient management in the PR China. Computers and Electronics in Agriculture, 36(2-3), 165-172.

Jose, S. (2009). Agroforestry for ecosystem services and environmental benefits: an overview. Agroforestry systems, 76(1), 1-10.

Jouquet, P., Bernard-Reversat, F., Bottinelli, N., Orange, D., Rouland-Lefèvre, C., Duc, T. T., et Podwojewski, P. (2007). Influence of changes in land use and earthworm activities on carbon and nitrogen dynamics in a steepland ecosystem in Northern Vietnam. Biology and Fertility of Soils, 44(1), 69-77.

Jouquet, P., Blanchart, E., et Capowiez, Y. (2014). Utilization of earthworms and termites for the restoration of ecosystem functioning. Applied soil ecology, 73, 34-40

Jouquet, P., Dauber, J., Lagerlöf, J., Lavelle, P., et Lepage, M. (2006). Soil invertebrates as ecosystem engineers: intended and accidental effects on soil and feedback loops. Applied soil ecology, 32(2), 153-164.

Jouquet, P., Janeau, J. L., Pisano, A., Sy, H. T., Orange, D., Minh, L. T. N., et Valentin, C. (2012). Influence of earthworms and termites on runoff and erosion in a tropical steep slope fallow in Vietnam: a rainfall simulation experiment. Applied soil ecology, 61, 161-168.

Jouquet, P., Traoré, S., Choosai, C., Hartmann, C., et Bignell, D. (2011). Influence of termites on ecosystem functioning. Ecosystem services provided by termites. European Journal of Soil Biology, 47(4), 215-222.

Jullien A., et Huet P. (2005). Agriculture de précision. Agricultures et territoires, Lavoisier, Paris, France, 223-238.

Kadeba, A., Sambare, O., Soulama, S., Thiombiano, A., Schmidt, M., et Boussim, J. I. (2014). Typologie spatiale de la végétation sahélienne en relation avec les indicateurs de dégradation au Burkina Faso. International Journal of Biological and Chemical Sciences, 8(3), 1049-1064.

Karambiri, H., Ribolzi, O., Delhoume, J. P., Ducloux, J., Coudrain-Ribstein, A., et Casenave, A. (2003). Importance of soil surface characteristics on water erosion in a small grazed Sahelian catchment. Hydrological Processes, 17(8), 1495-1507.

Karambiri, H., Ribolzi, O., Delhoume, J.-P., Ducloux, J., Coudrain-Ribstein, A., Casenave, A., (2003). Importance of soil surface characteristics on water erosion in a small grazed Sahelian catchment. Hydrological Processes 17, 1495–1507.

Karimou, M., et Atikou, A. (2002). Les systèmes agriculture-élevage au Niger. Improving Crop-Livestock Systems in the Dr Systems in the Dry Savannas of y Savannas of West and Central Africa. P.78.

Kaspar T. C., Colvin T. S., Jaynes D. B., Karlen D. L., James D. E., Meek D. W., et Butler H., (2003). Relationship between six years of corn yields and terrain attributes. Precision Agriculture, 4(1), 87-101.

Kaspar, T.C., Colvin, T.S., Jaynes, D.B., Karlen, D.L., James, D.E., Meek, D.W., Pulido, D., Butler, H., (2003). Relationship between six years of corn yields and terrain attributes. Precision Agriculture 4, 87–101.

Kissou, R., Traoré, E., Gnankambary, Z., Nacro, H., et Sédogo, M. (2014). Connaissance endogène de la classification et de la fertilité des sols en zone Sud-Soudanienne du Burkina Faso. [VertigO] La revue électronique en sciences de l'environnement, 14(1).

Konaté, S., Le Roux, X., Tessier, D., et Lepage, M. (1999). Influence of large termitaria on soil characteristics, soil water regime, and tree leaf shedding pattern in a West African savanna. Plant and Soil, 206(1), 47-60.

Konaté. N. M (2010). Diversité interspécifique d'efficience d'utilisation de l'eau des acacias sahéliens et australiens. Thèse de Doctorat de l'Université Henri Poincaré, Nancy-I en Biologie Forestière, P.120.

Kravchenko, A. N., et Bullock, D. G. (2000). Correlation of corn and soybean grain yield with topography and soil properties. Agronomy Journal, 92(1), 75–83.

Kravchenko, A.N., Bullock, D.G., (2000). Correlation of corn and soybean grain yield with topography and soil properties. Agronomy Journal 92, 75–83.

Kristiansen, S. M., Amelung, W., et Zech, W. (2001). Phosphorus forms as affected by abandoned anthills (Formica polyctena Förster) in forest soils: sequential extraction and liquid-state 31P-NMR spectroscopy. Journal of Plant Nutrition and Soil Science, 164(1), 49-55.

L'Hôte Y., Mahé G. (1996) Afrique de l'Ouest et Centrale. Précipitations moyennes annuelles (période 1951-1989). Echelle 1/6 000 000ème. Coll. des cartes ORSTOM, IRD Ed.

Lahmar R., Bationo B. A., Dan Lamso N., Guéro Y., et Tittonell 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.

Lamers,J.PA. et Feil, P.R. (1995). Farmer's knowledge and management of spatial soil and crop growth variability in Niger, West Africa. Netherland Journal of Agricultural Science 43 (1995) 375-389.

Larwanou M., Abdoulaye M., et Reij C. (2006a): Etude de la Régénération Naturelle Assistée (RNA) dans la Région de Zinder (Niger), revue, USAID/egat, P.19.

Larwanou M., Saadou M. et Hamadou S. (2006b): Les arbres dans les systèmes agraires en zone sahélienne du Niger: mode de gestion, atouts et contraintes, TROPICULTURA, P.5.

Larwanou, M., Oumarou, I., Snook, L., Danguimbo, I., et Eyog-Matig, O. (2010). Pratiques sylvicoles et culturales dans les parcs agroforestiers suivant un gradient pluviométrique nord-sud dans la région de Maradi au Niger. Tropicultura, 28(2), 115-122.

Lavelle, P., Bignell, D., Lepage, M., Wolters, V., Roger, P., Ineson, P., Heal, O.W., Dhillion, S., (1997). Soil functions in a changing world: the role of invertebrate ecosystem engineers. Eur. J. Soil Biol. 33, 159-193.

Le Barbé L., Lebel T. et Tapsoba D., (2002). Rainfall Variability in West Africa during the Years 1950- 90. Journal of Climate, 15, 187-202.

Le Barbe, L. et Lebel, T. (1997) Rainfall climatology of the HAPEX-Sahel region during the years 1950-1990, 1. Hydrol. 188-189, 43-73.

Le Breton, E., (2012). Réponses hydrologiques et géomorphologiques aux changements environnementaux au Sahel nigérien ». Thèse de géographie en cotutelle Université Paris 1 Panthéon Sorbonne et Université Abdou Moumouni de Niamey, 210 p.

Le Gal, P. Y. (1987). L'agriculture sahélo-soudanienne face à la sécheresse: l'exemple de la région de Maradi (Niger). Cahiers de la Recherche-Développement, (16), 42-50.

Le Houérou, H. N. (1995). Considérations biogéographiques sur les steppes arides du nord de l'Afrique. Science et changements planétaires/Sécheresse, 6(2), 167-182.

Lebel, T. et Ali, A. (2009) Recent trends in the Central and Western Sahel rainfall regime (1990-2007). Journal of Hydrology 375 (1-2), 52-64.

Lebel, T., Ali, A., (2009). Recent trends in the Central and Western Sahel rainfall regime (1990–2007). Journal of Hydrology 375, 52–64.

Leduc, C., Favreau, G., et Schroeter, P. (2001). Long-term rise in a Sahelian water-table: The Continental Terminal in south-west Niger. Journal of hydrology, 243(1-2), 43-54.

Li, H. et Reynolds, J. F., (1994). A simulation experiment to quantify spatial heterogeneity in categorical maps. Ecology, 75(8): pp. 2446 - 2455.

Li, H., Lascano, R. J., Booker, J., Wilson, T., et Bronson, K. F. (2001). Cotton lint yield variability in a heterogeneous soil on a landscape-scale. Soil and Tillage Research, 58(3), 245–258.

Li, H., Lascano, R.J., Booker, J., Wilson, L.T., Bronson, K.F., (2001). Cotton lint yield variability in a heterogeneous soil at a landscape scale. Soil and Tillage Research 58, 245–258.

Li, X.F., Chen, Z., Chen, H.B et. Chen Z.Q. (2011). Spatial Distribution of Soil Nutrients and Their Response to Land Use in Eroded Area of South China. Procedia Environmental Sciences 10 (2011) 14-19

Li, X.Y., Gong, J.D., Gao, Q.Z. and Wei, X.H., (2000). Rainfall interception loss by pebble mulch in the semiarid region of China. Journal of Hydrology, vol. 228(3 4): 165 173.

Libert C., et Eyog Matig O. (1992). *Faidherbia albida* et production cotonnière. Modification du régime hydrique et des paramètres de rendements du coton sous couvert du parc arboré au Nord-Cameroun. Cahier scientifique N°12. P103-121.

Loireau, M., D'Herbes, J.M., Delabre, E., (2000). Evolution et place de la jachère à travers une analyse spatiale des interactions ressources-usages au Sahel agro-pastoral nigérien. In :

Loko, L. E. Y., Orobiyi, A., Agre, P., Dansi, A., Tamò, M., et Roisin, Y. (2017). Farmers' perception of termites in agriculture production and their indigenous utilization in Northwest Benin. Journal of ethnobiology and ethnomedicine, 13(1), 64.

Louppe D, N' Dour B. , Samba S.A.N. , (1996). Influence de *Faidherbia albida* sur l'arachide et le mil au Sénégal R. Peltier (Ed.), Les parcs à *Faidherbia*, Cahiers Scientifiques, vol. 12 (1996), pp. 123-193

M'Biandoun M., Guibert H. et Olina J. P., (2007). Savoir paysan et fertilité des terres au Nord-Cameroun. Cah. Agric, 16, 3, pp. 185-197

Madadji B. (2012). Dynamique saisonnière de la strate herbacée sur un bassin versant du sahel nigerien (Wankama, commune rurale de Dantiandou/Niger). Mémoire Master 2: Biodiversité et Gestion de l'Environnement Soudanien et Sahélo- Saharien (M2 BGE /SSS)/Université de Maradi. 79 pages.

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 Savanes africaines: des espaces en mutation, des acteurs face à de nouveaux défis. Actes du colloque, Garoua, Cameroun (pp. 7-p). Cirad-Prasac.

Madukwe, D. K., Christo, I. E. C., et Onuh, M. O. (2008). Effects of organic manure and cowpea (*Vigna unguiculata* (l.) Walp) varieties on the chemical properties of the soil and root nodulation. Science World Journal, 3(1).

MAG (2010). Rapport d'évaluation préliminaire des récoltes 2011, et résultats de la campagne agricole 2011/2012. République du Niger, Ministère de l'agriculture. Direction des statistiques. 26 pages.

Mahamane A., (2005). Etudes floristique, phytosociologique et phytogéographique de la végétation du Parc Régional du W du Niger. Thèse de doctorat d'Etat, Université Libre de Bruxelles, 484p

Mahamane, A., Mahamane, S., Yacoubou, B., Issaka, A., Ichaou, A., et Saley, K. (2007). Analyse diachronique de l'occupation des terres et caractéristiques de la végétation dans la commune de Gabi (région de Maradi, Niger). Science et changements planétaires/Sécheresse, 18(4), 296-304.

Malam Abdou M. (2005). Genèse et morpho-dynamique actuelle des bas-fonds Sahéliens : étude comparative de quelques bas-fonds ruraux de socle et de Bassin sédimentaire dans l'ouest nigérien. Mémoire de Maîtrise ; Département de Géographie, Faculté des lettres et des sciences humaines, Université Abdou Moumouni de Niamey, Niger. P. 141.

Malam Abdou, M. (2014). Etats de surface et fonctionnement hydrodynamique multi-échelles des bassins sahéliens ; études expérimentales en zones cristalline et sédimentaire. Thèse de doctorat, Université de Grénoble-France et Abdou Moumouni-Niger, P.261.

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.

Malam Abdou, M., Vandervaere, J. P., Descroix, L., Moussa, I. B., Faran Maiga, O., Abdou, S., Bodo Seyni, B et Daouda, M. L. O. (2015). Evolution de la conductivité hydraulique d'un sol sableux cultivé dans l'Ouest du Niger. Biotechnologie, Agronomie, Société et Environnement, 19(3), 270-280.

Malam Issa O. (2007). Evolution de la structure, fonctionnement hydrique et transfert de matière à la surface du sol. Mémoire sur travaux, Ecole doctorale Sciences, Technologie, Santé (ED 358), P.260.

Malam Issa, O., Valentin, C., Rajot, J.L., Cerdan, O., Desprats, J.-F., Bouchet, T., (2011). Runoff generation fostered by physical and biological crusts in semi-arid sandy soils. Geoderma 167–168, 22–29. https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2011.09.013

Maman, N., Abdou, G., et Garba, M. (2018). Optimizing Fertilizer Use by Smallholder Farmers and Economic Returns to Maize in Semi-arid Niger. Journal of Agricultural Science and Technology B 8 (2018) 85-96.

Mamoudou, B. M., Rabiou, H., Inoussa, M. M., Bakasso, Y., et Mahamane, A. (2015). Bio-indicateurs de la fertilité des sols et la perception paysanne à l'Ouest du Niger. Journal of Applied Biosciences, 89(1), 8281-8290.

Mando, A., Ouattara, B., Somado, A. E., Wopereis, M. C. S., Stroosnijder, L., & Breman, H. (2005). Long-term effects of fallow, tillage and manure application on soil organic matter and nitrogen fractions and on sorghum yield under Sudano-Sahelian conditions. Soil use and management, 21(1), 25-31.

Mando, A., Stroosnijder, L., & Brussaar, L. (1996). Effects of termites on infiltration into crusted soil. Geoderma, 74(1-2), 107-113.

Manssour AM, Zoubeirou AM, Kadri A, Ambouta JMK, Dan Lamso N, 2013. Effet de l'arbre *Acacia senegal* sur la fertilité des sols de gommeraies au Niger. Int. J. Biol. Chem. Sci., 7(6): 2328-2337.

Manssour AM, Zoubeirou AM, Kadri A, Ambouta JMK, Dan Lamso N, 2013. Effet de l'arbre *Acacia senegal* sur la fertilité des sols de gommeraies au Niger. Int. J. Biol. Chem. Sci. 7(6): 2328-2337.

Marichatou, H., Yambab, B., Drame, Y. A., et Amoukou, I. (2007). Vulnérabilité et innovations paysannes: L'expérience d'Aguié au Niger. Presses université de Louvain.

Martin, P., (1999). Reducing flood risk from sediment laden agricultural runoff using intercrop management techniques in northern France. Soil et Tillage Research, vol. 52: 233 245.

Martins L. M. V,· Xavier G. R, Rangel · F. W, · Ribeiro J. R. A, Neves· M. C. P, Morgado· L. B, Rumjanek N. G. (2003). Contribution of biological nitrogen fixation to cowpea: a strategy for improving grain yield in the semi-arid region of Brazil. Biol Fertil Soils (2003) 38:333–339

Massuel, S. (2005) Evolution récente de la ressource en eau consécutive aux changements climatiques et environnementaux du sud-ouest Niger. Modélisation des eaux de surface et souterraines du bassin du kori de Dantiandou sur la période 1992-2003. Université Montpellier II - Sciences et Techniques du Languedoc.

M'Biandoun, M., Guibert, H., et Olina, J. P. (2003). Caractérisation de la fertilité du sol en fonction des mauvaises herbes présentes. In Savanes africaines: des espaces en mutation, des acteurs face à de nouveaux défis. Actes du colloque, Garoua, Cameroun (pp. 8-p). Cirad-Prasac.

ME/LCD. (2004) Consultation sectorielle sur l'environnement et la lutte contre la Désertification ; Région de Tillabéry.

Meng, L., Ding, W., et Cai, Z. (2005). Long-term application of organic manure and nitrogen fertilizer on N2O emissions, soil quality and crop production in a sandy loam soil. Soil Biology and Biochemistry, 37(11), 2037-2045.

Miao S.J., Qiao Y.F., Han X.Z., An M., (2007). Nodule formation and development in soybeans (Glycine max L.) in response to phosphorus supply in solution culture. Pedosphere 17(1): 36-43.

Michot, D., (2003). Intérêt de la géophysique de subsurface et de télédétection multispectrale pour la cartographie des sols et le suivi de leur fonctionnement hydrique à l'échelle intraparcellaire, Université Paris 6, Paris

Mifouna. J. P, (1999). Evaluation de gènes de résistance à la chaleur chez le niébé (*vigna unguiculata* (L) walp), mémoire de fin d'études/ CNRA-BAMBEY, P.95.

Milleville, P. et G. Serpantié., (1992). Regards sur l'élaboration de la production agricole en agriculture paysanne tropicale. Problèmes de méthode. Dans : Statistique impliquée, 107- 124, Collection Colloques et Séminaires. ORSTOM, Paris.

Minchin, F. R., et Summerfield, R. J. (1976). Symbiotic nitrogen fixation and vegetative growth of cowpea (*Vigna unguiculata* (L.) Walp.) in waterlogged conditions. Plant and Soil, 45(1), 113-127.

Moumouni, D. A., Doumma, A., et Sembene, M., (2013). Influence des zones agroécologiques 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.

Mounirou L.A. (2012).Etude du ruissellement et de l'érosion à différentes échelles spatiales sur le bassin versant de Tougou en zone sahélienne du Burkina Faso : Quantification et transposition des données. Thèse en cotutelle entre Université de Montpellier 2 et 2iE. P.249

Moussa B. M., Diouf A., Abdourahamane S. I., Axelsen J. A., Ambouta J.M.K., et Mahamane A., (2016). Combined traditional water harvesting (Zaï) 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.

N'Dayegamiye, A. (1990). Effets à long terme d'apports de fumier solide de bovins sur l'évolution des caracteristiques chimiques du sol et de la production de maïs-ensilage. Canadian journal of plant science, 70(3), 767-775.

Nacro HB (1997) Hétérogénéité fonctionnelle de la matière organique dans un sol de savanne humide (Lamto, Côte d'Ivoire): caractérisation chimique et étude, in vitro, des activités microbiennes de minéralisation du carbone et de l'azote. Thèse de Doctorat, Université Paris VI.

Nation Unie, (2015). World population prospects—the 2015 revision. New York, 2015.

N'Dayegamiye, A., Goulet, M., et Laverdière, M. R. (1997). Effet à long terme d'apports d'engrais minéraux et de fumier sur les teneurs en C et en N des fractions densimétriques et des agrégats du loam limoneux Le Bras. Canadian journal of soil science, 77(3), 351-358.

Ndor, E., Dauda, N., Abimuku, E., Azagaku, D., et Anzaku, H. (2012). Effect of phosphorus fertilizer and spacing on growth, nodulation count and yield of cowpea (*Vigna unguiculata* (L) Walp) in Southern Guinea Savanna agroecological zone, Nigeria. Asian Journal of Agricultural Sciences, 4(4), 254-257.

N'Gbesso, F. D. P. M., Fondio, L., Dibi, B. E. K., Djidji, H. A., et Kouame, C. N. (2013). Étude des composantes du rendement de six variétés améliorées de niébé [*Vigna unguiculata* (L.) Walp]. Journal of Applied Biosciences, 63(1), 4754-4762.

Niang, D., Mermoud, A., Yacouba, H., et Karambiri, H. (2004). Fonctionnement hydrique de différents types de formations éoliennes en milieu sahélien burkinabé. Sud Sciences et Technologies, 12 (6).

Nkaa, F. A., Nwokeocha, O. W., et Ihuoma, O. (2014). Effect of phosphorus fertilizer on growth and yield of cowpea (*Vigna unguiculata*). IOSR J. Pharm. Biol. Sci, 9(5), 74-82.

Nkouannessi M. (2005). The genetic, morphological and physiological evaluation of African cowpea genotypes. Thesis, University of the Free State Bloemfontein, South Africa, p.131.

Oliver R., Depommier D., et Janodet E. (1993). Influence de *Faidherbia albida* sur le sol et le sorgho. Obersvatoire dans le parc de Watinoma au Burkina Faso. Les parcs à *Faidherbia*. Cahier scientifique N°12. P141-152.

Olsen, R. J., Hensler, R. F., et Attoe, O. J. (1970). Effect of manure application, aeration, and soil pH on soil nitrogen transformations and on certain soil test values 1. Soil Science Society of America Journal, 34(2), 222-225.

Onyibe, J. E., Kamara, A. Y., et Omoigui, L. O. (2006). Guide to cowpea production in Borno State, Nigeria. Promoting Sustainable Agriculture in Borno State (PROSAB), Ibadan, Nigeria.

Othman, W. W., Lie, T. A., et Wassink, G. Y. (1991). Low level phosphorus supply affecting nodulation, N 2 fixation and growth of cowpea (*Vigna unguiculata* L. Walp). Plant and Soil, 135(1), 67-74.

Ouattara, K., Barron, J., Ouedraogo, I., et Gordon, L. J. (2015). Etats des écosystèmes sahéliens: reverdissement, perte de la diversité et qualité des sols. Afrique Science, 11(5), 433-446.

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.

Ouedraogo, P. (1997). Rôle des termites dans la structure et la dynamique d'une brousse tigrée soudano-sahélienne (Doctoral dissertation, Paris 6).

Ouédraogo, S. 2005. Intensification de l'agriculture dans le Plateau Central du Burkina Faso: une (Doctoral dissertation, University of Groningen).

Ouédraogo, Z.M,. (2014). Effets de la couverture du sol à base de *Piliostigma reticulatum* (De) Hoscht sur l'association sorgho-niébé dans le village de Yilou, Province du BanI (BURKINA FASO). Mémoire de fin cycle, Production végétale, Université Polytechnique de Bobo-Dioulasso-Institut Du Développement Rural. P.65.

Oumar D.N.A.K. (2017). Caractérisation et hiérarchisation des contraintes édaphiques liées à la production du niébé (*Vigna unguiculata* L. [Wap]) et propositions d'améliorations

dans le terroir villageois de Tarna (Maradi). Mémoire de fin de cycle pour l'obtention du Diplôme de Master 2, Mention: Agro-écologie, Option: «Gestion Intégrée des Sols et des Eaux», Faculté d'Agronomie, Université Abdou Moumouni de Niamey, P.88.

Ousmane M.Z.Y. (2017). Caractérisation et hiérarchisation des contraintes édaphiques liées à la production du niébé (*Vigna unguiculata* L. [Wap]) et propositions d'améliorations dans le terroir villageois de Tarna (Maradi). Mémoire de fin de cycle pour l'obtention du Diplôme de Master 2, Mention: Agro-écologie, Option: «Gestion Intégrée des Sols et des Eaux», Faculté d'Agronomie, Université Abdou Moumouni de Niamey, P.103.

Ozer, A., et Ozer, P. (2005). Désertification au Sahel: Crise climatique ou anthropique?. Bulletin des Séances de l'Académie royale des Sciences d'Outre-Mer, 51(4), 395-423.

Ozer, P., (2000). Les lithométéores en région sahélienne: un indicateur climatique de la désertification (PhD Thesis). Université de Liège Faculté des Sciences Liège Belgique, Liège, Belgique.

Ozer, P., Hountondji, Y., Niang, A. J., Karimoune, S., Laminou Manzo, O., et Salmon, M. (2010). Désertification au Sahel: historique et perspectives. Bulletin de la Société Géographique de Liège, 54, 69-84.

Ozer, P., n.d. DÉSERTIFICATION AU SAHEL : HISTORIQUE ET PERSPECTIVES 16.

Panneton, B., Brouillard, M., et Piekutowski, T. (2002). Gestion de séries pluriannuelles de cartes de rendement. Canadian Biosystems Engineering, 44, 7-23.

Papy, F., Boiffin, J., (1988). Influence des systèmes de culture sur les risques d'érosion par ruissellement concentré. II. Evaluation des possibilités de maîtrise du phénomène dans les exploitations agricoles. Agronomie, vol. 8(9): 745 756.

Peoples, M. P., Herridge, D. F. and J. K. Ladha (1995). Biological nitrogen fixation: an efficient source of nitrogen for sustainable agricultural production? Plant and Soil 174: 3-28.

Perron, I. (2002). Influence de la microtopographie sur le rendement des cultures et la qualité des sols. Thèse de Maîtrise. Institut National de Recherche Scientifique, INRS-EAU. Université du Québec. 109 p.

Peugeot, C., (1995). Influence de l'encroutement superficiel du sol sur le fonctionnement hydrologique d'un versant sahélien (Niger) : expérimentations in-situ et modélisation (thesis). Université Joseph Fourier (Grenoble).

Piéri C, (1989). Fertilité des terres de savane. Bilan de trente années de recherche et de développement agricole au sud du Sahara. Ministère de la Coopération et du Développement. Cirad, Paris. 444p.

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

Pierre, C., Kergoat, L., Hiernaux, P., Baron, C., Bergametti, G., Rajot, J.-L., Abdourhamane Toure, A., Okin, G.S., Marticorena, B., (2018). Impact of Agropastoral Management on Wind Erosion in Sahelian Croplands. Land Degrad. Dev. 29, 800–811. https://doi.org/10.1002/ldr.2783

Planchon, O., Esteves, M., Silvera, N., Lapetite, J. M., et Cadet, P. (1999). Les microreliefs générés par la culture attelée dans le bassin arachidier sénégalais. Des formes utiles mais éphemères. Bulletin-Réseau Erosion, (19), 405-416.

Prince SD, Wessels KJ, Tucker CJ, Nicholson SE, (2007). Desertification in the Sahel: a reinterpretation of a reinterpretation. Global Change Biology 13 : 1308-13.

PRODEX, (2010). Plan d'actions opérationnel de la filière niébé (*vigna unguiculata* (l.) walp du Niger. Rapport définitif.P.93.

PROTA (2006). Ressources végétales de l'Afrique tropicale 1 : céréales et légumes secs. Amazon France, P.327.

Quin F. M., (1997).Introduction in: Advances in Cowpea Research, 375p.Roose E., (2004). La gestion conservatoire de l'eau, et de la fertilité des sols : une stratégie nouvelle de la lutte antiérosive pour le développement durable. Sécheresse n° I, vol. 15. P.8.

Rajot, J. L. (2001). Wind blown sediment mass budget of Sahelian village land units in Niger. Bulletin de la Société Géologique de France, 172(5), 523-531.

Rasmussen K, Bjarne F, Madsen JE, 2001. Desertification in reverse? Observations from northern Burkina Faso. Global Environmental Change 11 : 271-82.

Reij, C., Tappan, G., et Smale, M. (2009). Re-greening the Sahel: farmer-led innovation in Burkina Faso and Niger. Millions fed: proven successes in agricultural development, 53-58.

Rodríguez-Caballero, E., Cantón, Y., Chamizo, S., Afana, A., Solé-Benet, A., (2012). Effects of biological soil crusts on surface roughness and implications for runoff and erosion. Geomorphology 145–146, 81–89. https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2011.12.042

Rodríguez-Caballero, E., Cantón, Y., Chamizo, S., Lázaro, R., Escudero, A., (2013). Soil Loss and Runoff in Semiarid Ecosystems: A Complex Interaction Between Biological Soil Crusts, Micro-topography, and Hydrological Drivers. Ecosystems 16, 529–546. https://doi.org/10.1007/s10021-012-9626-z

Roose E., V. Kaboré V., et, Guenat C., (1995). Le zaï, une technique traditionnelle africaine de réhabilitation des terres dégradées de la région soudano-sahélienne (Burkina Faso). John Libbey Eurotext, Paris © 1995, pp. 249-265.

Roose E., (1976). Contribution à l'étude de l'influence de la mésofaune sur la pédogénèse actuelle en milieu tropical. Rapp. Mult. ORSTOM-Abidjan. P.56.

Roose E., (1993). Capacité des jachères à restaurer la fertilité des sols pauvres en zone soudano-sahélienne d'Afrique occidentale. Collection La jachère en Afrique de l'ouest, ORSTOM, CEDEX1. P. 234-244.

Roose E., (1994). Introduction à la GCES. Bulletin FAO des Sols, Rome, n°70, 420 p.

Roose, E. (1989). Gestion conservatoire des eaux et de la fertilite 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.

Roose, E., Dugué, P., et Rodriguez, L. (1992). La GCES: une nouvelle stratégie de lutte anti-érosive appliquée à l'aménagement de terroirs en zone soudano-sahélienne du Burkina-Faso. Bois et forêts des tropiques, (233), 49-63.

Roose, E., Kaboré, V., et Guenat, C., (1993). Fonctionnement, limites et amélioration d'une pratique traditionnelle africaine de réhabilitation de la végétation et de la productivité des terres dégradées en région soudano-sahélienne (Burkina Faso). Cah. Orstom, sér. Pédol., vol. XXVIII, no 2, 1993 : 159-173.

Roth, C., (2004). A framework relating soil surface condition to infiltration and sediment nutrient mobilization in graze rangelands of northeastern Queensland, Australia. Earth Surface Processes and Landforms, vol. 29: 1093 1104.

Rowe, E. C., Van Wijk, M. T., De Ridder, N., et Giller, K. E. (2006). Nutrient allocation strategies across a simplified heterogeneous African smallholder farm. Agriculture, ecosystems et environment, 116(1-2), 60-71.

Sadeghi, A., Graff, C. D., Starr, J., McCarty, G., Codling, E., et Sefton, K. (2006). Spatial variability of soil phosphorous levels before and after poultry litter application. Soil science, 171(11), 850-857.

Sagna, P., Ndiaye, O., Diop, C., Niang, A. D., et Sambou, P. C. (2016). Les variations récentes du climat constatées au Sénégal sont-elles en phase avec les descriptions données par les scénarios du GIEC ?. 2268-3798.

Samaké, O., Dakouo, J. M., Kalinganire, A., Bayala, J., et Koné, B. (2011). Régénération naturelle assistée—Gestion des arbres champêtres au Sahel. ICRAF Technical Manual, (16).

Samarajeewa, K. B. D. P., Horiuchi, T., et Oba, S. (2006). Finger millet (Eleucine corocana L. Gaertn.) as a cover crop on weed control, growth and yield of soybean under different tillage systems. Soil and Tillage Research, 90(1-2), 93-99.

Sanchez, P.A., (2002). Soil fertility and hunger in Africa. Science 295, 2019–2020.

Sanginga, N., Lyasse, O., Singh, B.B., (2000). Phosphorus use efficiency and nitrogen balance of cowpea breeding lines in a low P soil of the derived savanna zone in West Africa. Plant Soil 220, 119–128.

Sani Issa M. S. (2015): Contraintes édaphiques liées a la production du niébé (*vigna unguiculata* (l.) walp) et propositions d'amélioration dans le terroir villageois de Banizoumbou. Mémoire de fin de cycle pour l'obtention du Diplôme de Master 2, Mention: Agro-écologie, Option: «Gestion Intégrée des Sols et des Eaux», Faculté d'Agronomie, Université Abdou Moumouni de Niamey, P.91

Sarr, O., Bakhoum, A., Diatta, S., et Akpo, L. E. (2013). L'arbre en milieu soudano-sahélien dans le bassin arachidier (Centre-Sénégal). Journal of Applied Biosciences, 61, 4515-4529.

Sawadogo A. (2009).Evaluation de la production du niébé (*Vigna unguiculata* (L.) Walpers) en condition de stress hydrique: contribution au phénotypage et à la sélection du niébé pour la résistance à la sécheresse. Diplôme d'ingénieur du développement rural, Université Polytechnique de Bobo-Dioulasso. P.90

Saxena, A., Singh, D. V., et Joshi, N. L. (1997). Effects of tillage and cropping systems on soil moisture balance and pearl millet yield. Journal of Agronomy and Crop Science, 178(4), 251-257.

Sclagia A., Mody F., Yriarte F., Eresue M., Danguioua A., Amadou D., Zanguina, Mossi A., Inja, Abba, Mahamou M., Ousmane K., Mahamadou K., Bouzou (2001). Initiative pour la fertilité des sols et la collecte des eaux de ruissellement (IFS/CER). Plan d'action national, République du Niger. 44p

Sédogo M., (1993). Évolution des sols ferrugineux lessivés sous culture : incidence des modes de gestion sur la fertilité. Thèse de doctorat : Université Nationale de Côte d'Ivoire, Abidjan (Côte d'Ivoire).

Seguis, L., Cappelaere, B., Milési, G., Peugeot, C., Massuel, S., et Favreau, G. (2004). Simulated impacts of climate change and land-clearing on runoff from a small Sahelian catchment. Hydrological Processes, 18(17), 3401-3413.

Serpantié G. et Badiori O. (2001). La jachère en Afrique tropicale- Ch. Floret, R. Pontanier lohn Libbey Eurotext, Paris © 2001, pp. 21-83

Seubert C.E., Sanchez P. A. et Valverde C. (1977). Effects of land clearing methods on soil properties and crop performance in Ultisol of the Amazon Jungle of Peru.Trop. Agr. 54 : 307-321.

Seymour, C. L., Milewski, A. V., Mills, A. J., Joseph, G. S., Cumming, G. S., Cumming, D. H. M., et Mahlangu, Z. (2014). Do the large termite mounds of Macrotermes concentrate micronutrients in addition to macronutrients in nutrient-poor African savannas?. Soil Biology and Biochemistry, 68, 95-105.

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 (1), 65-79

Seyni Bodo B. (2013). Etude comparative de l'érosion et du ruissellement sur les formations du socle du Liptako et du bassin sédimentaire des Iullemenden. Mémoire de fin de cycle es sciences agronmiques, Faculté d'agronomie-Universite Abdou Moumouni de Niamey, P. 65.

Seyni Bodo, B., (2011). Influence de la présence des croûtes microbiotiques sur l'érosion et le ruissellement dans l'ouest nigérien. Mémoire de maitrise, Faculté d'Agronomie/UAM, P.45.

Sighomnou, D., Descroix, L., Genthon, P., Mahé, G., Moussa, I. B., Gautier, E., ... et Rajot, J. L. (2013). La crue de 2012 à Niamey: un paroxysme du paradoxe du Sahel?. Science et changements planétaires/Sécheresse, 24(1), 3-13.

Singh B.B., Ajeigbea H.A., Tarawalib S.A., Fernandez-Riverac S and Abubakarb Musa (2003). Improving the production and utilization of cowpea as food and fodder. Field Crops Research 84 (2003) 169–177

Smektala G., Peltier R., Sibelet N., Leroy M., Manlay R., Njiti C. F., Ntoupka M., Njiemoun A., Palou O., Tapsou. (2005). Parcs agroforestiers sahéliens : de la conservation à l'aménagement. VertigO, vol. 6, n° 2, 13 p.

Somé, A., Alexandre, D. Y., et Hien, V. (1999). Bio-indicateurs paysans de la fertilité des sols et gestion du cycle culture-jachère en zone soudanienne (Burkina Faso). Journal d'agriculture traditionnelle et de botanique appliquée, 41(2), 137-145.

Souhore P. (2010): Nodulation et performance agronomique de cinq variétés de niébé (*Vigna unguiculata* [L.] Walp) sur un vertisol a Djangal dans la Région de l'extrême Nord du Cameroun. Mémoire de diplôme d'Ingénieur Agronome, Université de Dschang, Faculté d'Agronomie et des Sciences Agricoles, Département d'Agriculture, page 4-48;

Soumana I., (2002). Comment les paysans distinguent-ils les sols fertiles ? Étude des indicateurs paysans de la fertilité dans l'arrondissement de Mayahi (Maradi, Niger). In : Dégradation des sols au Sahel - Méthodes et techniques de lutte. Actes du Séminaire de formation, CNEARC, Montpellier, p. 7-25.

Souty, N., et Rode, C. (1994). La levée des plantules au champ: un problème de mécanique?. Science et changements planétaires/Sécheresse, 5(1), 13-22.

SRAT., (2008). Aménagement du territoire. Niger, Maradi, 46p.

Stein, A., Brouwer, J., et Bouma, J. (1997). Methods for comparing spatial variability patterns of millet yield and soil data. Soil Science Society of America Journal, 61(3), 861-870.

Sterk, G., et Haigis, J. (1998). Farmers' knowledge of wind erosion processes and control methods in Niger. Land Degradation et Development, 9(2), 107-114.

Sterk, G., Stein, A., (1997). Mapping wind-blown mass transport by modeling variability in space and time. Soil Science Society of America Journal 61, 232–239.

Stoop, W.A. (1986). Agronomic Management of Cereal/Cowpea Cropping Systems for Major Toposequence Land Types in The West African Savanna", Field Crops Research vol. 14, p. 301-319.

Suzuki K., Matsunaga R., Hayashi K., Matsumoto N., Tabo R., Tobita S., et Okada K. (2014). Effetcts of traditional soil management practices on the nutrient status in Sahelian sandy soils of Niger, West Africa. Geoderma 223-225 (2014) 1-8.

Tano, Y., et Lepage, M. (1990). Les termites: dynamique des nids épigés et interactions avec les composantes du milieu. Structure et fonctionnement hydropédologique d'un petit bassin versant de savane humide. ORSTOMéditions, coll. Études et Thèses, Paris, 105-116.

Thiombiano, L. (2000). Etude de l'importance des facteurs édaphiques et pédopaysagiques dans le développement de la désertification en zone sahélienne du Burkina Faso. These d'État, université de Cocody, République de Côte d'Ivoire.

Tidjani, A. D., Bielders, C. L., et Ambouta, K. J. M. (2009). Dynamique saisonnière des paramètres déterminant l'érosion éolienne sur les pâturages dunaires du Niger oriental. Geo-Eco-Trop, 33, 39-56.

Timlin, D. J., Pachepsky, Y. A., Snyder, V. A., et Bryant, R. B. (1999). Soil surface curvature and the spatial and temporal variability of corn grain yields on a hillslope. Precision Agriculture, (precisionagric4a), 203-214.

Timsina, J., Garrity, D. P., et Pandey, R. K. (1994a). Plant water relations and growth of cowpea cultivars subjected to varying degrees of waterlogging. Field Crops Research, 39(1), 49-57.

Timsina, J., Garrity, D. P., et Pandey, R. K. (1994b). The interaction of cowpea maturity with degree of waterlogging in the post-rice environment. Field Crops Research, 39(1), 39-48.

Tittonell P., Muriuki A., Klapwijk C. J., Shepherd K. D., Coe, R., et 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.

Tittonell P., Shepherd K. D., Vanlauwe B., et Giller K. E., (2008). 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., Vanlauwe, B., Leffelaar, P. A., Rowe, E. C., et Giller, K. E. (2005a). 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., Vanlauwe, B., Leffelaar, P. A., Shepherd, K. D., et Giller, K. E. (2005b). 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 & environment, 110(3-4), 166-184.

Titus, J. H., Nowak, R. S., et Smith, S. D., (2002). Soil resource heterogeneity in the Mojave Desert. Journal of Arid Environments, 52(3), 269-292).

Tola, E., Al-Gaadi, K. A., Madugundu, R., Zeyada, A. M., Kayad, A. G., et Biradar, C. M. (2017). Characterization of spatial variability of soil physicochemical properties and its impact on Rhodes grass productivity. Saudi journal of biological sciences, 24(2), 421-429.

Toudou A. (1986). Contribution à la connaissance des maladies du niébé (*Vigna unguiculata* (L.) walp.) au Niger avec mention spéciale au *Macrophomina phaseseolina* (Tassi) Goïd. Thèse de docteur-Ingénieur en sciences agronomique 128p.

Toudou A. (1995). Etude de deux parasites d'origine tellurique sur niébé: *Macrophomina phaseolina* (Tassi) Groid. et *Striga gesnrioïdes* (Willd). Thèse de docteur Es-sciences naturelles 102p

Touma, J., Perez, P., & Todoroff, P. (1999). Caractérisation hydrodynamique d'un sol encroûté en zone sahélienne. 2. Modélisation du processus d'infiltration. Agronomie, 19(5), 341-348. .

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. P.250.

Tscharntke T., Tylianakis J. M., Rand T. A., Didham R. K., Fahrig L., Batary P., Bengtsson J., Clough Y., Crist T. O., Dormann C. F., Ewers R. M., Frund J., Holt R. D., Holzschuh A.,

Klein A. M., Kleijn D., Kremen C., Landis D. A., Laurance W., Lindenmayer D., Scherber C., Sodhi N., Steffan-Dewenter I., Thies C., Van der Putten W. H. and Westphal C. (2012). Landscape moderation of biodiversity patterns and processes eight hypotheses. Biological Reviews 87 (3): 661685.

Turner, M. D., et 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 et Environment, 211, 73-83.

Valentin, C., et Bresson, L. M. (1992). Morphology, genesis and classification of surface crusts in loamy and sandy soils. Geoderma, 55(3-4), 225-245.

Valentin, C., Rajot, J. L., et 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 et environment, 104(2), 287-302.

Valet, S., Coustumer, P.L., Motelica-Heino, M., (2007). Rôle de l'encroûtement superficiel des sols sur leur fonctionnement hydrique : Conséquences hydrologiques et hydro-pédologiques. Presented at the 32ème J. Sci. du GFHN, "De la particule au milieux poreux : Formation,évolution & transferts". Groupe Francophone Humidimétrie et Transferts en Milieux Poreux., pp. 61–67.

Vall É. et al.., (2012). Intégration agriculture-élevage et intensification écologique dans les systèmes agrosylvopastoraux de l'Ouest du Burkina Faso, province du Tuy. In : Vall É., Andrieu N., Chia E., Naccro H.B., éds. Actes du séminaire ASAP, Partenariat, modélisation, expérimentations : quelles leçons pour la conception de l'innovation et l'intensification écologique ?, 15 au 17 novembre 2011, Bobo-Dioulasso, Burkina Faso. Montpellier, France : Cirad.

Vallée, L. (2001) Utilisation de la conductivité électromagnétique pour l'étude de la structure spatiale et l'estimation de propriété du sol dans trois agroécosystèmes tempérés humides du Québec. Thèse de doctorat (version préliminaire soumise pour évaluation) Université Laval. Sainte-Foy.123

Vandervaere, J. P. (1995, October 9) Caractérisation hydrodynamique du sol in situ par infiltrométrie à disques : analyse critique des régimes pseudo-permanents, méthodes transitoires et cas des sols encroutés. Université Joseph-Fourier - Grenoble I.

Vandervaere, J. P., Angulo Jaramillo, R., Peugeot, C. & Vauclin, M. (1996). Caractérisation hydrodynamique in situ de sols encroûtés. In : Interactions surface continentale/atmosphère : l'expérience HAPEX-Sahel Colloques et Séminaires (M. Hoepffner, T. Lebel & B. Monteny, eds.), 63–78. Paris : ORSTOM.

Vandervaere, J. P., Peugeot, C., Vauclin, M., Angulo Jaramillo, R. & Lebel, T. (1997). Estimating hydraulic conductivity of crusted soils using disc infiltrometers and minitensiometers. Journal of Hydrology 188–189 (0), 203–223.

Vasseur C., Joannon A., Aviron S., Burel F., Meynard J. M., et 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., et 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.

Wang Jun, and Sha Liqing. (2007). Effects of land use on soil nutrients in Tibetan Region, Northwest Yunnan, China, Journal of Northeast Forestry University, 10, 45-47, 66.

Wang, C., Nolin, M. C., et Wu, J. (1995). Microrelief and spatial variability of some selected soil properties on an agricultural benchmark site in Quebec, Canada. In : Site-specific management for agricultural systems. American Society of Agronomy, Crop Science Society of America, Soil Science Society of America, 1995. p. 339-350.

Warren, A., Batterbury, S. P. J., et 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.

Wei, J. B., Xiao, D. N., Zeng, H., et Fu, Y. K. (2008). Spatial variability of soil properties in relation to land use and topography in a typical small watershed of the black soil region, northeastern China. Environmental geology, 53(8), 1663-1672.

West, T; Wilding, J.; Calhoun. G. (1984). Soil survey of the Icrisat Sahelian center.The texas AetM University Systm/Tropsoils in cooperation with the International crops Research Institute for the Semi-Arid Tropics, Niger, West Africa

Weynants, M. (2005). Caractérisation des propriétés hydrodynamiques et étude de la possibilté d'agrégation de trois types de sols au Fakara, Niger (Doctoral dissertation, Thèse de doctorat, UNIVERSITE CATHOLIQUE DE LOUVAIN).

Wezel, A., Rajot, J. L., et 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.

WinklerPrins A.M.G.A., 2003 - Local soil knowledge insights, applications, and challenges. Geoderma, 111, pp. 165-170.

Yamba, B. (2004) Les mutations des systèmes agraires et des modes d'usage des ressources naturelles dans la zone centrale du Niger. rga 92 (1), 97–110.

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.

Yaméogo, G., Yélémou, B., et Traoré, D. (2005). Pratique et perception paysannes dans la création de parc agroforestier dans le terroir de Vipalogo (Burkina Faso). Biotechnol. Agron. Soc. Environ., 4: 241- 248.

Yelemou, B., Dayamba, S. D., Bambara, D., Yamego, G., Assimi, S., (2013). Soil carbon and nitrogen dynamics linked to Piliostigma species in ferugino-tropical soils in the Sudano-Sahelian zone of Burkina Faso, west of Africa. Journal of Forestery Research (2013) 24(1): 99-108.

Yelemou, B., Yamego, G., Koala, J., Batiano, B. A., Hien, V., (2014). Influence of the leaf biomass of Piliostigma reticulatum on Sorghum production in North Sudanian Region of Burkina Faso. Journal of Plant Studies; Vol. 3, No. 1; P-80-89. [En ligne] URL: http://dx.doi.org/10.5539lips.v3nlp80 consulté le 21/01/2014.

Yoka J, Loumeto J, Djego J G, Houinato M, Aouango P. (2014). Adaptation d'un cultivar de niébé (*Vigna unguiculata* L. (Walp.) aux conditions pédoclimatique de la zone de Boundji (République du Congo). Afrique Science, 10 (1): 217-225.

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.

Zerbo, L., Nacro, H. B., Yao-Kouame, A., et Sedogo, P. M. (2016). Connaissances et perceptions locales de la dynamique des cuirasses ferrugineuses: Etude de cas en

zone Nord-soudanienne et Sud-soudanienne du Burkina Faso. International Journal of Biological and Chemical Sciences, 10(6), 2754-2767.

Zhang, S., Zhang, X., Huffman, T., Liu, X., et Yang, J. (2011). Influence of topography and land management on soil nutrients variability in Northeast China. Nutrient Cycling in Agroecosystems, 89(3), 427-438.

Zhang, X. Y., Yue-Yu, S. U. I., Zhang, X. D., Kai, M. E. N. G., et Herbert, S. J. (2007). Spatial variability of nutrient properties in black soil of northeast China. Pedosphere, 17(1), 19-29.

Zingore, S., Murwira, H. K., Delve, R. J., et 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.

Zongo KF. 2013. Associations légumineuses céréales dans les agrosystèmes soudano sahéliennes du Burkina Faso : Perceptions et pratiques paysannes, effets du zaï et des amendements organiques et organo-minéraux sur les rendements des cultures associées niébé-sorgho. Mémoire de fin de cycle, DEA, systèmes de productions végétales. Science du sol, IDR/UPB, 55p.

Zoundi J.S. Butaré I., Ndikumana J.N. et Adomefa K. (ed). 2006. Integration agriculture-élevage alternative pour une gestion durable des ressources naturelles et une amélioration de l'économie familiale en Afrique de l'Ouest et du Centre. Ouagadougou INERA, Nairobi ILRI, Dakar : CORAF/WECARD. P.374 .

Zounon C. S. F. (2015): Contraintes édaphiques liées a la production du niébé (*vigna unguiculata* (l.) walp) et propositions d'amélioration dans le terroir villageois de Sadoré (Commune Rurale de Youri), Mémoire de fin de cycle pour l'obtention du Diplôme de Master 2, Mention: Agro-écologie, Option: «Gestion Intégrée des Sols et des Eaux», Faculté d'Agronomie, Université abdou Moumouni de Niamey, P.68.

Zwaenepoel, P., et Le Bars, J. M. (1997). L'agriculture de précision. Ingénieries-EAT, (12), p-67.

ANNEXES

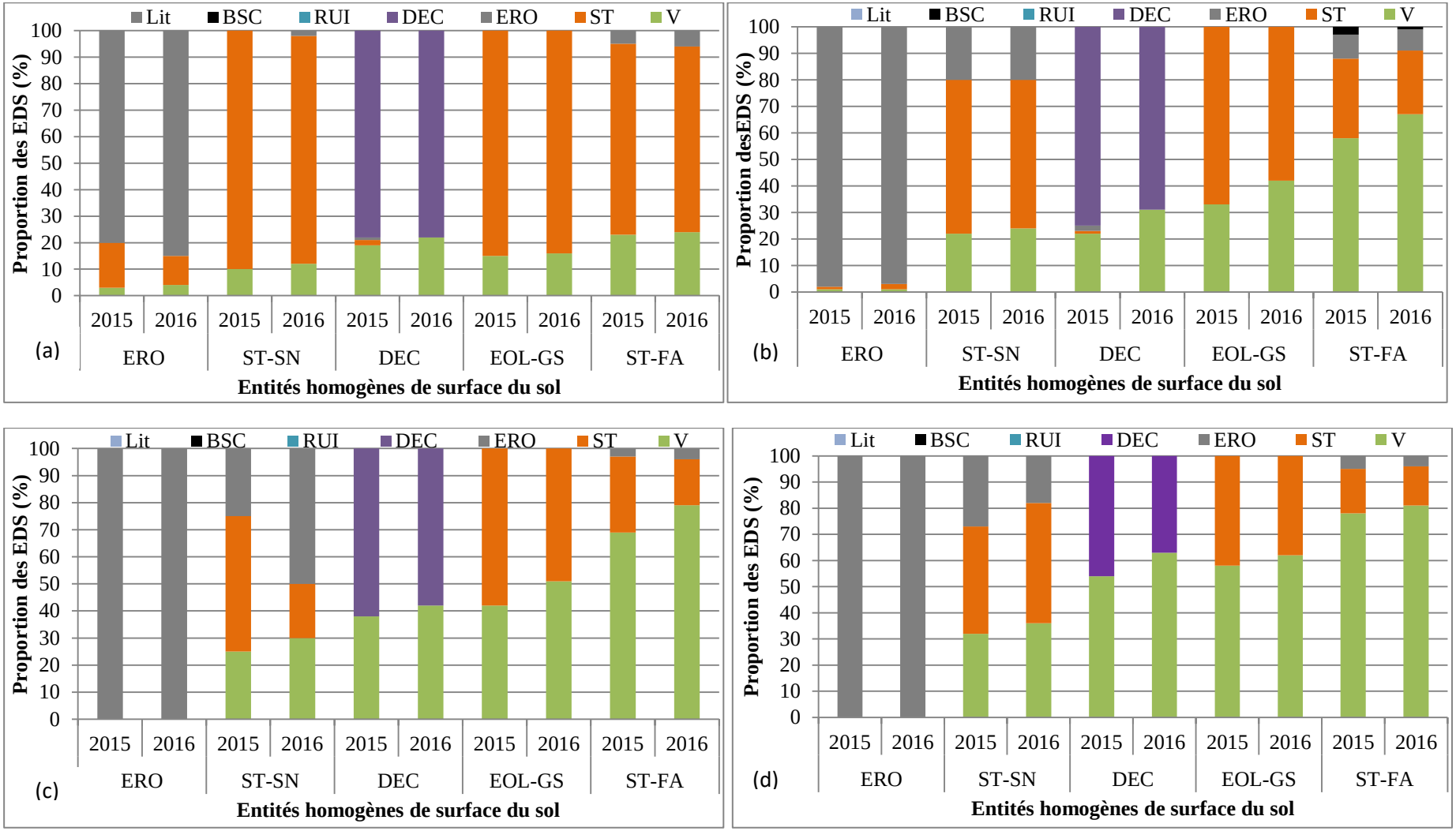
Annexe 1

En général, l'analyse des figures ci-après montre une tendance au recouvrement végétal de la superficie des EHS depuis la levée jusqu'à la maturité en lieu et place des organisations pelliculaires de surface (OPS). A la levée, les relevés ont été réalisés avant les premiers sarclages et reflètent en général l'état du profil cultural de type C2 (porosité vésiculaire comprise entre 5 à 30%) dans les champs en début de la saison culturale. A ce stade les résultats montrent que la croûte structurale est l'OPS qui occupe en grande partie l'EHS ST-SN (72-92 %), OL-GS, (83-89 %), ST-FA (71-81 %) et ST-F (73-83 %). On note par ailleurs la présence d'une faible proportion de croûte d'érosion sur les EHS ST-SN. Durant cette phase de la croissance du niébé, la croûte de décantation est l'organisation pelliculaire de surface la plus répandue (74-85 %) sur les EHS DEC au niveau des sols ferrugineux tropicaux de Banizoumbou, Sadoré et Arraourayé. Sur les EHS des sols alluviaux de *Goulbi* Maradi, elle représente 71-76 % de la surface du sol sur DEC-AL et seulement 26-29 % sur DE-AL-FA. Les EHS ERO sont presque totalement marquées par la croûte d'érosion (80-97 %). Sur les sols ferrugineux tropicaux des différents sites, la levée du niébé est toujours plus importante par ordre croissant respectivement sur EOL-GS, DEC, ST-FA et ST-F. Par rapport aux EHS sur les sols alluviaux de *Goulbi* de Maradi, on observe que la levée est plus importante sur l'EHS DEC-AL-FA du site de Tarna. Cette levée est surtout associée à celle des adventices qui pullulent au niveau de ce type d'entité dès les premières pluies. Les résultats ont relevés que les plus faibles levées du niébé ont été obtenues sur ERO (1-6 % de recouvrement végétal) et ensuite ST-SN (7-13 %).

Durant les trois stades qui suivent notamment ceux de la ramification, de la floraison et de la maturité, on note un développement relativement important de la végétation sur l'ensemble des EHS des sites quel que soit le type de sol sauf sur ERO où à partir du stade de floraison on assiste à la disparition des pieds du niébé et de tout autre type de végétation. Cette croissance est plus importante par ordre d'importance sur les EHS DEC-AL-FA, ST-FA, ST-F, DEC-AL, EOL-GS et DEC. La croissance du niébé reste relativement nonchalante sur ST-SN où on assiste progressivement malgré les deux sarclages, au développement de la croûte d'érosion sur cette entité (17-25 %). Les croûtes d'érosion sont également observées sur ST-FA. Ce type de croûte constitue une contrainte majeure au développement des cultures. Sur la base de la présence de ce type d'OPS, véritable contrainte pour les cultures, en fonction des stades phénologiques du niébé les résultats révèlent que ce sont les stades de floraison et de maturité qui constituent les stades les plus exposés à cette contrainte. Les images aériennes prises durant la phase de ramification montre le caractère hétérogène du développement des cultures à l'intérieur des champs agricoles (figure 66).

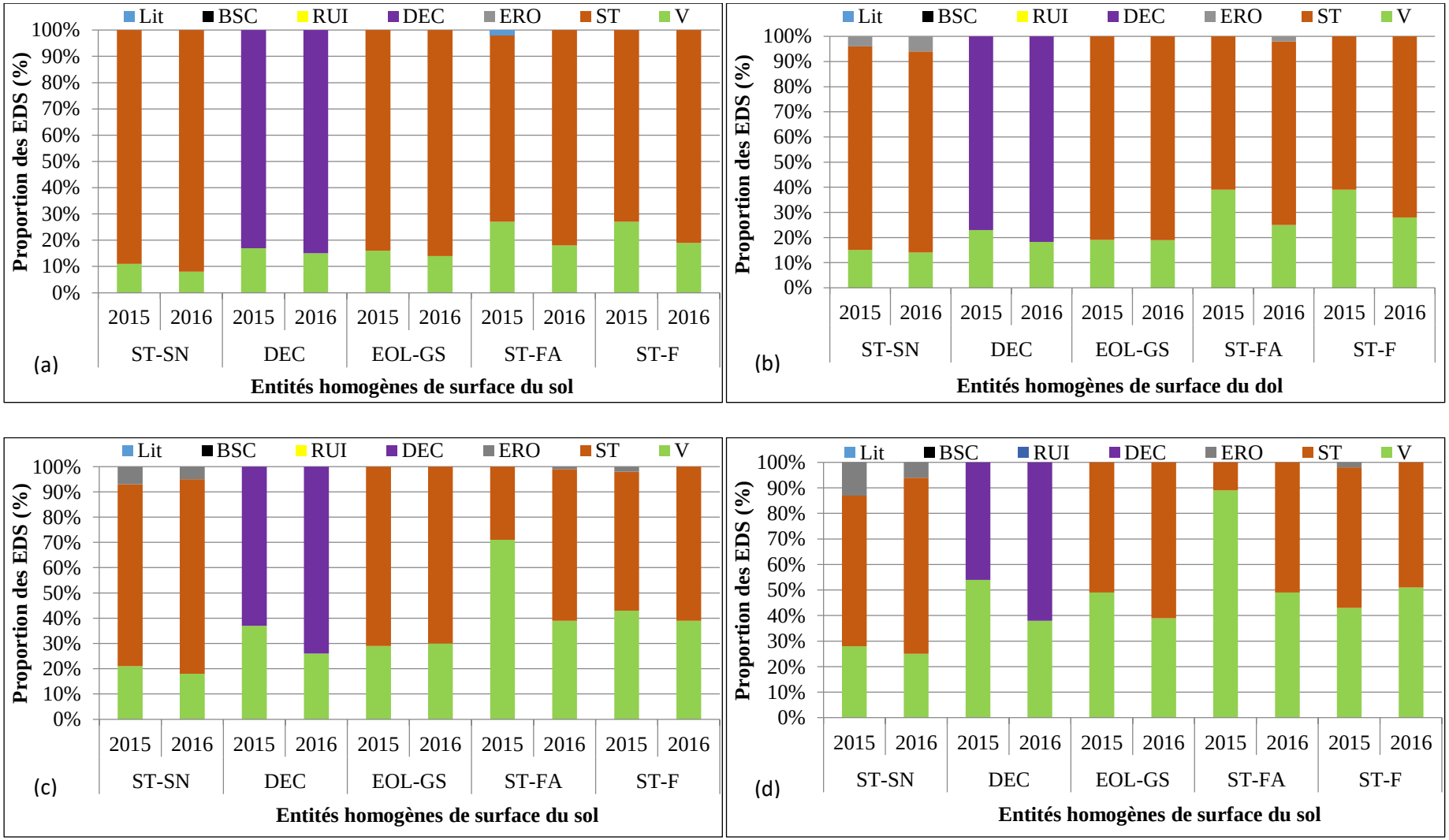
La comparaison de l'évolution des EDS entre les sites fait remarquer :

- un développement quoique relativement faible des croûtes microbiotiques ou biologiques en particulier sur les EHS de type ST-FA sur les sites de Banizoumbou et Tarna au cours de la saison des culturale ;
- la tendance évolutive des EDS des EHS de même type s'apparente relativement entre elles en fonction des sites. On note cependant que le recouvrement végétal est relativement important sur les sites de Sadoré et Tarna par rapport à Banizoumbou et Arraourayé plausiblement en liaison avec les bonnes conditions pluviométriques et les moindres pressions parasitaires qui prévalent sur ces sites.

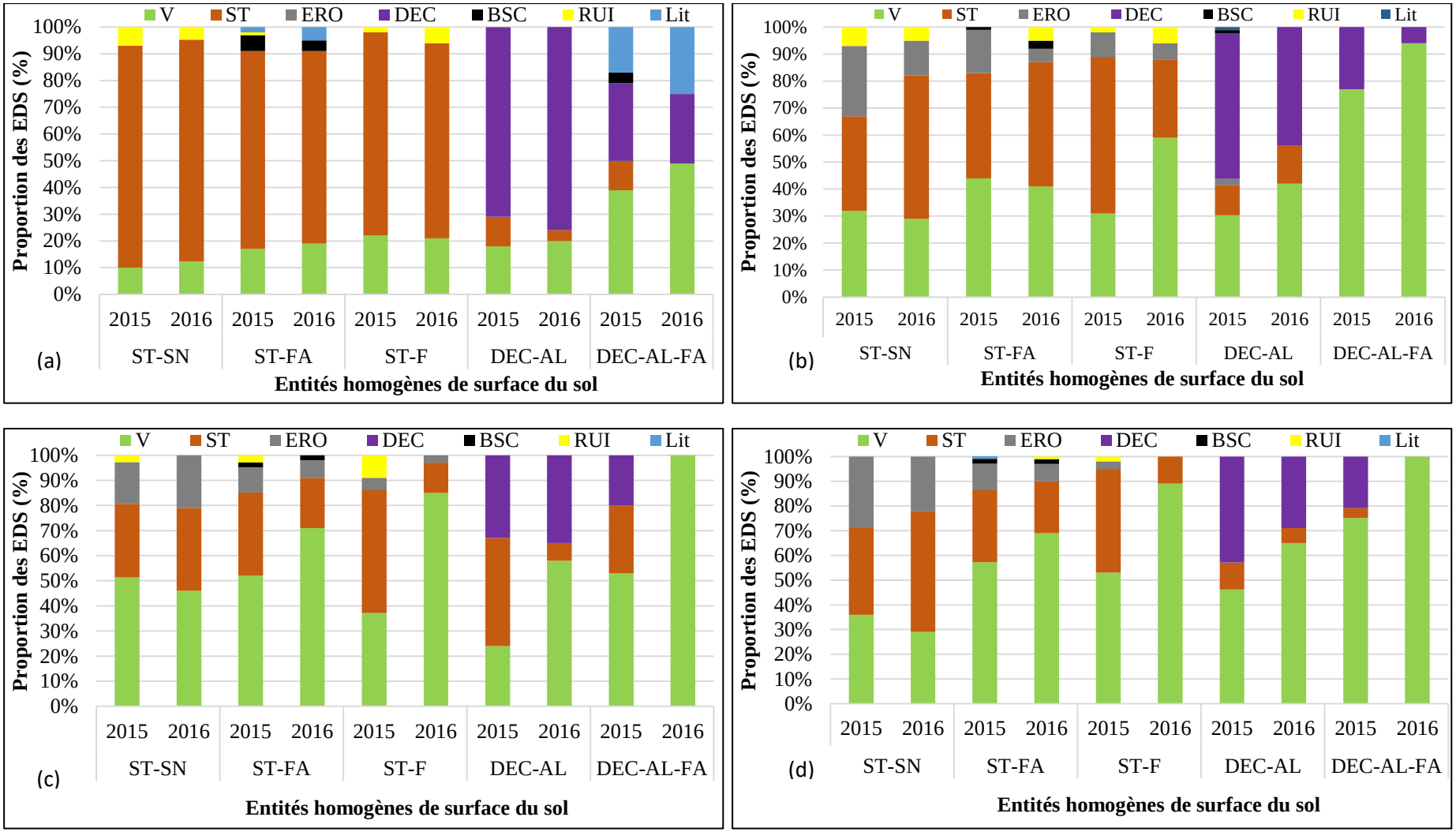


1.

1. Evolution des EDS en fonction des EHS des stades phénologiques à Sadoré : (a) Levée ; (b) Ramification ; (c) Floraison ; (d) Maturité



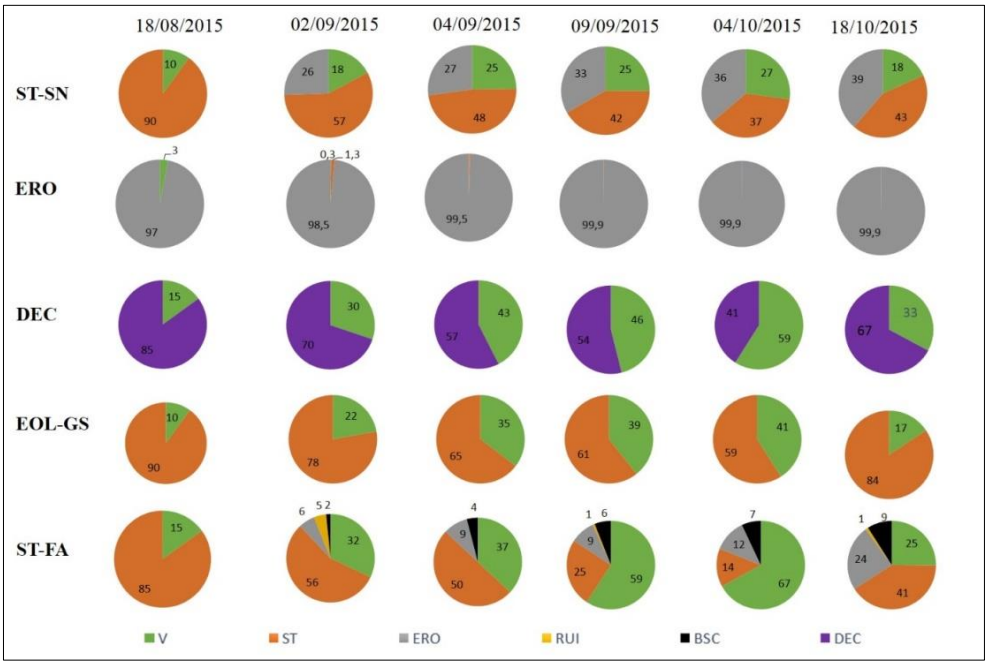
2.Evolution des EDS en fonction des EHS des stades phénologiques à Arraourayé : (a) Levée ; (b) Ramification ; (c) Floraison ; (d) Maturité



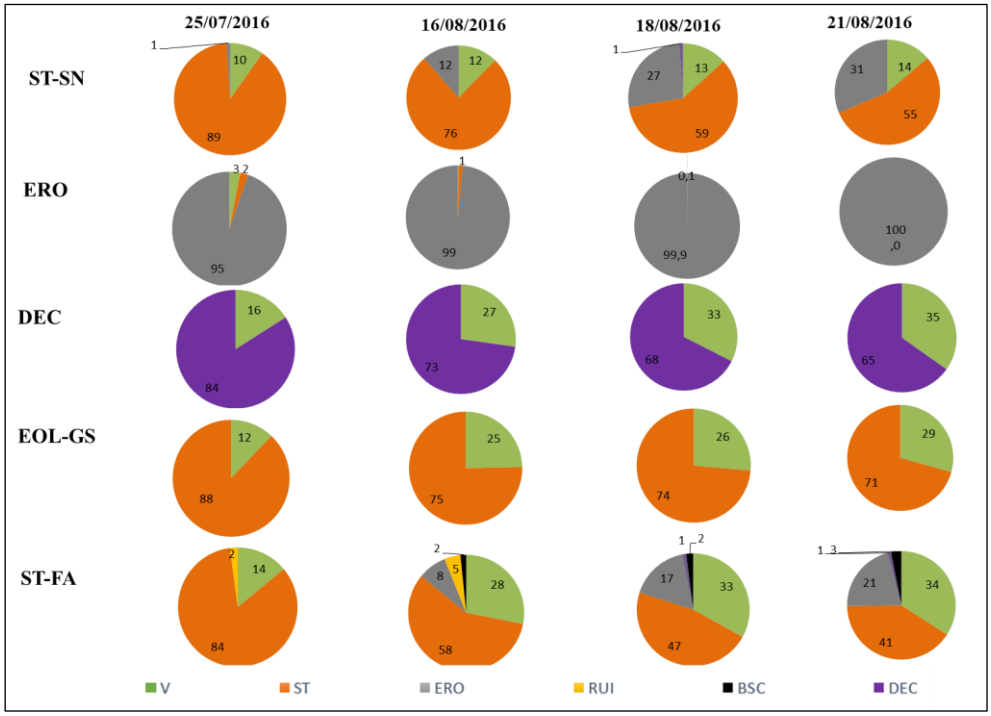
3.Evolution des EDS en fonction des EHS des stades phénologiques à Tarna : (a) Levée ; (b) Ramification ; (c) Floraison ; (d) Maturité

Evolution temporelle des états de surface après sarclage en fonction de l'hétérogénéité de surface du sol

Les figures 67 et 68 expriment l'évolution temporelle après sarclage des EDS en fonction de l'hétérogénéité de surface du sol. Après le sarclage, les sols sont remaniés et présentent une bonne aération et une bonne perméabilité. Dès les premières pluies qui suivent ce travail du sol, les organisations de pellicules de surface se reconstituent. La croûte structurale (ST) est l'OPS qu'on retrouve en grande partie, en particulier sur les EHS ST-SN, EOL-GS, ST-FA. D'autre part, sur les EHS DEC et ERO, ce sont les croûtes de décantation (DEC) et d'érosion (ERO) qui abondent. Cette installation des croûtes traduit le caractère éphémère de l'effet de ce travail du sol. On peut constater que les ST-SN ont une forte sensibilité au développement des croûtes d'érosion qui occupent progressivement une proportion considérable, de 1 à 31% et de 0 à 39% en 2015 et 2016, au détriment du couvert végétal. Ce type de croûte se développe aussi sur ST-FA (0-21 et 0-24% en 2015 et 2016). La formation des croûtes d'érosion est la phase ultime de l'estompage de l'effet de du travail du sol sur l'infiltration des sols. Il y a une certaine colonisation bien que relativement petite de cette surface par les croûtes biologiques. En ce qui concerne le développement de la végétation (niébé et autres mauvaises herbes), il est généralement noté que les surfaces favorables à leur développement sont par ordre d'importance sur ST-FA, DEC, EOL-GS et ST-SN. Sur ERO, le développement de la végétation est fortement contrarié et la végétation disparaît définitivement au cours de la saison.



Évolution temporelle des EDS en fonction des EHS après le sarclage sol en 2015



Évolution temporelle des EDS en fonction des EHS après le sarclage sol en 2016

Annexe 2

Méthodologie sur le traitement d'images sentinel-2

Copernicus, programme de l'Union européenne, permet de rassembler l'ensemble des données obtenues à partir de satellites environnementaux et d'instruments de mesure sur site, afin de produire une vue globale et complète de l'état de notre planète. Avec un accord signé en février 2008, la commission européenne, qui finance Copernicus et organise la fourniture des données et des services associés, a délégué à l'Agence Spatiale Européenne (ESA) la responsabilité technique de l'infrastructure spatiale (l'ensemble des satellites Sentinel). Avec sept satellites Sentinel en orbite qui livrent quotidiennement plusieurs téraoctets de données, Copernicus est le plus gros fournisseur au monde de données d'observation de la Terre. L'un des principes les plus importants de Copernicus est que toutes les données satellites obtenues sont fournies gratuitement et à n'importe qui dans le monde.

Les données Sentinel-2 optique utilisées pour cette étude sont en libre accès total avec une résolution temporelle moyenne de 6 jours (pixel à 10m).

Les images Sentinel sont mises à disposition de manière libre et gratuite via la plate-forme scientifique Copernicus Open Access Hub (https://scihub.copernicus.eu/dhus/#/home) de l'ESA et la plate-forme Internet PEPS du CNES (https://peps.cnes.fr/rocket/).

La plate-forme d'applications Sentinel (SNAP) de l'ESA réunit toutes les boîtes à outils Sentinel (Toolboxes) afin d'offrir des traitements libres et gratuits pour l'exploitation scientifique des missions Sentinel.

Données optiques Sentinel-2

Dans le cadre du programme Copernicus (initiative européenne pour la mise en œuvre de services d'information en matière de protection de l'environnement et de sécurité), l'Agence Spatiale Européenne (ESA) a développé et lancé la mission Sentinel-2 qui fournit des produits de données optiques conçus pour alimenter les services en aval principalement liés à la surveillance terrestre, à la gestion des catastrophes et à la sécurité. Toutefois, les données peuvent être utilisées pour la cartographie de l'occupation de terres, la gestion des forêts, la gestion des ressources en eau, le suivi de la végétation, des cultures et la sécurité alimentaire.

Les images Sentinel-2 sont diffusées librement via la plate-forme scientifique Copernicus Open Access Hub (https://scihub.copernicus.eu/dhus//home) de l'ESA. Ces images Sentinel-2 sont retraitées au Niveau-1C, ce qui signifie qu'elles sont ortho-rectifiées, projetées en contenant les données de réflectance du haut de l'atmosphère. L'imagerie peut être utilisée facilement avec n'importe quel logiciel qui reconnaît les fichiers image JPEG 2000. Les métadonnées supplémentaires peuvent être utilisées avec la Toolbox Sentinel-2, une boîte à outils Open source développée pour l'Agence spatiale européenne (ESA). Cette boîte à outils comprend des outils de visualisation, d'analyse et de traitement des données Sentinel-2.

Suite à un accord de coopération, le CNES a développé le prototype du segment sol de traitement des données, défini et prototypé les traitements de niveau 1, développé un système de qualité d'image et un démonstrateur pour les traitements de niveau 2 (détection des nuages et corrections atmosphériques). Le CNES met à disposition de manière libre et gratuite les données des Sentinel-2 sur sa plate-forme Internet PEPS (https://peps.cnes.fr/rocket/), et fournit des produits corrigés des effets atmosphériques par l'intermédiaire du pôle thématique THEIA.

Les images Sentinel-2 fournissent des données complémentaires à des missions telles que LANDSAT, SPOT-Vegetation et les capteurs ENVISAT/MERIS (ESA, 2017). La mission Sentinel-2 est une constellation de deux satellites en orbite polaire Sentinel-2A et Sentinel-2B, chacun équipé d'un capteur optique multi spectral MSI (Multi-Spectral Instrument).

La mission Sentinel-2A a été lancée le 23 juin 2015 suivi par Sentinel-2B lancé le 7 mars 2017. Avec le début de la phase opérationnelle (16 juin 2017), la constellation des deux satellites permet l'acquisition d'images sur la même zone tous les 5 jours ou moins, avec un nœud descendant à 10 H 30 du matin. Cette heure locale a été choisie comme le meilleur compromis entre la réduction de la couverture nuageuse et l'assurance d'un bon ensoleillement. Elle est proche de l'heure locale du passage supérieur de Landsat et correspond aux données SPOT, ce qui permet de combiner les données Sentinel-2 avec des images historiques pour créer des séries chronologiques à long terme.

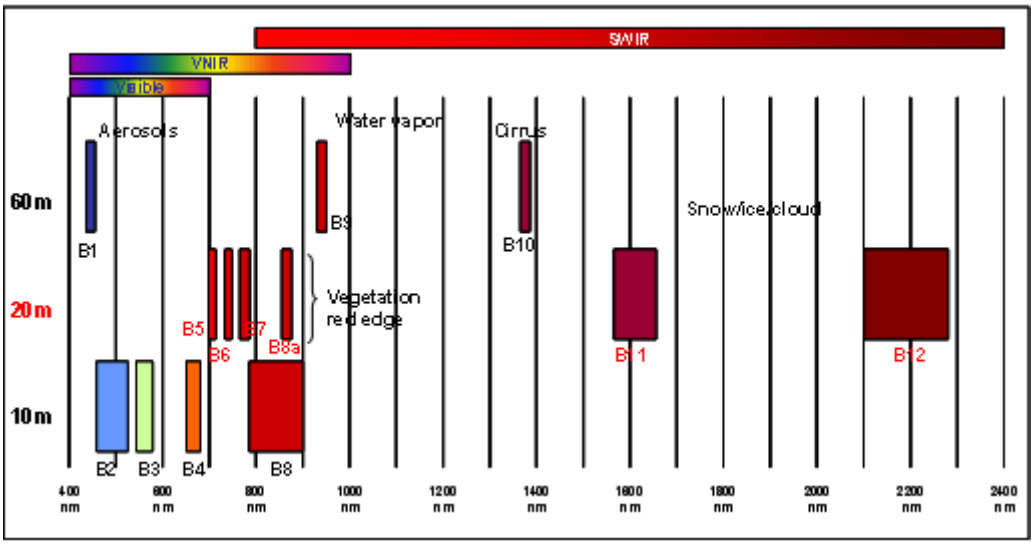
Les satellites Sentinel-2 recueillent systématiquement des observations sur les zones terrestres entre les latitudes 56° Sud et 84° Nord, ainsi que sur la surveillance des voies navigables intérieures et des zones côtières.

La résolution radiométrique de Sentinel-2 est de 12 bits, soit 212 valeurs d'intensité lumineuse potentielle pour l'image acquise (ESA, 2017). La combinaison d'une large bande spectrale de 290 km et de la nécessité d'une acquisition globale et continue avec une fréquence de revisite élevée, permettra de générer quotidiennement environ 1,6 TBytes de données brutes compressées d'images de la constellation. Les caractéristiques principales de la définition du système Sentinel-2 sont présentées dans le tableau 1.

Les 13 bandes spectrales s'étendent du spectre visible (VIS) et proche infrarouge (NIR) au spectre infrarouge à ondes courtes (SWIR) à différentes résolutions spatiales au sol allant de 10 à 60 m. Les quatre bandes, de 10 m de résolution spatiale assurent la compatibilité avec SPOT 4 et 5 et répondent aux besoins des utilisateurs pour la classification de l'occupation du sol. La résolution de 20 m pour six bandes a été une exigence pour d'autres paramètres de niveau 2. Les bandes à 60 m sont principalement dédiées aux corrections atmosphériques et au filtrage des nuages (443 nm pour la récupération des aérosols, 940 nm pour la correction de vapeur d'eau et 1375 nm pour la détection des cirrus). La résolution de 60 m a été jugée adéquate pour déterminer la variabilité spatiale des paramètres géophysiques atmosphériques.

Résolution spatiale	**Numéro de bande**	**Satellite Sentinel-2A**		**Satellite Sentinel-2B**	
		Longueur d'onde (nm)	Largeur de bande (nm)	Longueur d'onde (nm)	Largeur de bande (nm)
10m	2	496.6	98	492.1	98
	3	560.0	45	559	46
	4	664.5	38	665	39
	8	835.1	145	833	133
20m	5	703.9	19	703.8	20
	6	740.2	18	739.1	18
	7	782.5	28	779.7	28
	8a	864.8	33	864	32
	11	1613.7	143	1610.4	141
	12	2202.4	242	2185.7	238
60m	1	443.9	27	442.3	45
	9	945.0	26	943.2	27
	10	1373.5	75	1376.9	76

Caractéristiques des bandes spectrales des images Sentinel-2



Bandes spectrales des images Sentinel-2 (CESBIO)

Type de produits Sentinel-2

Deux types de produits optiques Sentinel-2 (niveaux 1C et 2A) sont disponibles pour les utilisateurs. Ces produits sont fournis sous format Sentinel-SAFE qui inclut les données d'image au format JPEG 2000, les indicateurs de qualité, les données auxiliaires et les métadonnées.

Le format SAFE enveloppe un dossier contenant les données image dans un format de données binaires et les métadonnées produit dans XML.

L'ESA produit et distribue des données ortho-rectifiées exprimées en réflectance au sommet de l'atmosphère, les niveaux 1C. Le produit de niveau 2A est une image mono-date ortho-rectifiée, exprimée en réflectance de surface (rapport de la luminance sur l'éclairement), accompagnée d'un masque de nuages/ombres de nuages/neige/eau. La pratique d'un traitement radiométrique incluant la correction atmosphérique devient indispensable dès que le traitement d'images de télédétection a pour but d'accéder à des propriétés quantifiées (grandeurs physiques) des surfaces et de comparer ces grandeurs physiques tirées de l'image à des mesures radiométriques de terrain.

Le pôle THEIA produit et distribue les données de niveau 2A corrigées des effets atmosphériques et des variations d'éclairement dues au relief, mais les zones traitées ne concernent que deux terroirs sur les 14 terrains d'étude. La boîte à outils Sen2Cor distribuée

par l'ESA va nous permettre de produire des images Sentinel-2 niveau 2A corrigées des effets atmosphériques et des effets des pentes à partir des données de niveau 1C.

Les tuiles de ces deux produits (niveaux 1C et 2A) sont des ortho-images de 100 x 100 Km^2 en projection UTM/WGS84 et d'une taille respective d'environ 1 Go (Niveau L1C) et 2 Go (Niveau L2A).

Dans ce travail, nous utilisons 17 images Sentinel-2A dont les principales caractéristiques ainsi et les dates d'acquisition par Site sont résumées dans le tableau ci-dessous :

Sites	Niveau	Zone géographique	Editeurs	Dates d'acquisition 2016
Tarna	L1C	N0204 R079 T32PKV	Copernicus	22 Juin 2016
	L1C	N0204 R079 T32PKV	Copernicus	12-22 Juillet 2016
	L1C	N0204 R079 T32PKV	Copernicus	01-11-21Août 2016
	L1C	N0204 R079 T32PKV	Copernicus	20-30 Septembre 2016
	L1C	N0204 R079 T32PKV	Copernicus	10-20-30 Octobre 2016
Banizoumbou, Sadore	L2A	N0207 R022 T31PDQ	Pôle Theia	08-28 Juillet 2016
	L2A	N0207 R022 T31PDQ	Pôle Theia	07 Août 2016
	L2A	N0207 R022 T31PDQ	Pôle Theia	06 Septembre 2016
	L2A	N0207 R022 T31PDQ	Pôle Theia	06-16 Octobre 2016

Caractéristiques des 17 images Optique Sentinel-2A utilisées
Période retenue : année 2016, de juillet (date de semis du niébé) à octobre (date de récolte du niébé)

Traitements des images Sentinel-2 acquises

Les opérations de traitement consistent à préparer les images Optique Sentinel-2 pour les principales analyses thématiques et à en extraire les informations utiles à l'atteinte des objectifs de l'étude. Le traitement des données a été réalisé avec le logiciel SNAP de l'ESA.

Prétraitements :

1. Corrections atmosphériques et des effets des pentes (Sen2Cor)
2. Ré-échantillonnage des bandes à 10 m
3. Découpage d'extraits d'image (23 extraits d'images)

Sen2Cor :

Pour exploiter au mieux le potentiel des données Sentinel-2 pour des applications terrestres quantitatives, des opérations de prétraitement ont été effectuées sur les images Sentinel-2 de niveau 1C à l'aide de la boîte à outils Sen2Cor distribuée par l'ESA. Sen2Cor est un processeur de niveau 2A dédié principalement aux différentes corrections atmosphériques des images de niveau 1C (Top-Of-Atmosphere: TOA) afin de fournir un produit de reflectance

de niveau 2A (Bottom-Of-Atmosphere: BOA). A l'issu du traitement, il en résulte des cartes additionnelles concernant l'épaisseur optique des aérosols (Aerosol Optical Thickness: AOT), de la vapeur d'eau (Water Vapour:WV) et de la classification des scènes (Scene Classification: SCL) avec des indicateurs de qualité pour les probabilités de nuages et de neige. Les sorties Sen2Cor sont réalisées pour des résolutions spatiales de 60 m, 20 m et 10 m.

La structure de base du processeur Sen2Cor (Figure 1) est constituée de cinq modules qui coordonnent les interactions dans le processus de travail, la lecture et le traitement des données, fournissent les paramètres de configuration, ainsi que la conversion des produits sous le format souhaité.

Deux principaux modules ont été conçus pour traiter les données d'entrée Sentinel-2 de niveau 1C, à savoir les modules de classification de scène (SCL) et de correction atmosphérique (AC).

Le principal processus de traitement consiste à lire et traiter les paramètres et les données d'entrée et à créer une base de données interne temporaire, qui sera par la suite utilisée par les modules SCL et AC pour extraire et stocker les données et les produits intermédiaires (Richter et al. 2012). Les sorties Sen2Cor sont réalisées pour des résolutions spatiales de 60 m, 20 m et 10 m.

En outre, afin de s'assurer d'une certaine homogénéité dans l'analyse, après la correction atmosphérique et de terrain sous le processeur Sen2cor, un ré-échantillonnage de bandes de 20 et 60 m à 10 m de résolution spatiale été appliqué en utilisant l'algorithme du plus proche voisin « *Nearest* », suivi d'un géo-référencement (Projection UTM, 32632N et 32631 N correspondant aux zones d'étude), sous SNAP 6.0.

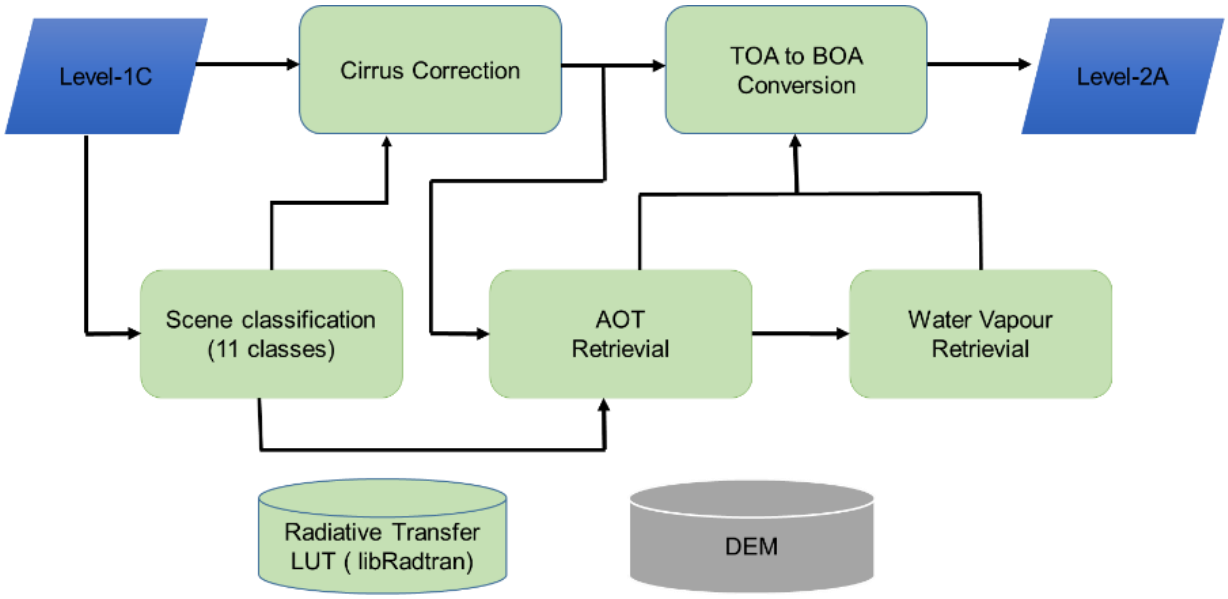


Figure 2. Principales étapes de traitement (L2A process) sous Sen2Cor (adapté de Gascon et al.2017)

Choix des indices

Les méthodes classiques d'agriculture de précision s'appuient sur les cartes de rendement des années antérieures (mesurées par exemple par GPS au moment de la moisson) et sur la connaissance des parcelles par l'agriculteur. Cette méthode a un défaut principal : elle ne prend que très partiellement en compte l'état réel de croissance de la végétation.

L'imagerie satellite a révolutionné l'agriculture de précision en ouvrant de nouvelles perspectives : les acquisitions d'images, effectuées à des stades clés de la croissance des cultures, permettent une mesure précise des paramètres biophysiques caractérisant l'état de la culture : indice foliaire (lié directement à la biomasse), teneur en chlorophylle, niveau de stress hydrique, anomalies de croissance ou maladies.

En analysant les parcelles agricoles dans des combinaisons de bandes et dans des indices différents (Vraies Couleurs, Fausses Couleurs, NDVI, NDWI, …), nous avons à notre disposition des méthodes et des outils pour l'aide à la décision.

Sentinel-2 : calcul des indices retenus

1. **NDVI (Normalized Difference Vegetation Index)**

   L'indice de végétation par différence normalisé, appelé aussi NDVI est construit à partir des canaux rouge(R) et proche infrarouge (PIR). L'indice de végétation normalisé met en valeur la différence entre la bande visible du rouge et celle du proche infrarouge.

   NDVI = (PIR - R) / (PIR + R)

   Cet indice est sensible à la vigueur et à la quantité de la végétation.
   Les valeurs du NDVI sont comprises entre -1 et +1, les valeurs négatives correspondant aux surfaces autres que les couverts végétaux, comme la neige, l'eau ou les nuages pour lesquelles la réflectance dans le rouge est supérieure à celle du proche infrarouge. Pour les sols nus, les réflectances étant à peu près du même ordre de grandeur dans le rouge et le proche infrarouge, le NDVI présente des valeurs proches de 0. Les formations végétales quant à elles, ont des valeurs de NDVI positives, généralement comprises entre 0,1 et 0,7. Les valeurs les plus élevées correspondant aux couverts les plus denses.

2. **NDII (Normalized Difference Infrared Index)**

   ou NDWI (Normalized Difference Water Index) proposé par Gao en 1996. Cet indice utilise une formulation de différence normalisée au lieu d'un simple ratio. C'est une mesure de réflectance, sensible aux changements de la teneur en eau du couvert végétal. Les valeurs d'indice augmentent avec l'augmentation de la teneur en eau. Les applications comprennent la gestion des cultures agricoles, la surveillance du couvert forestier et la détection de végétation stressée.

   NDII = (NIR - SWIR) / (NIR + SWIR)

   Où NIR est la bande proche infrarouge et SWIR la bande infrarouge à courte longueur d'onde. Pour les données Sentinel-2, ces bandes sont respectivement la 8A et la 11,

toutes deux de 20 m de résolution. L'indice varie de -1, sécheresse sévère, à 1, bonne humidité. La plage courante pour la végétation verte est comprise entre 0,02 et 0,6.

La réflectance dans la bande NIR est influencée par la structure interne des feuilles et la matière sèche de la plante. Le SWIR, lui, reflète les changements de la teneur en eau et la structure spongieuse de la mésophylle. Toutes choses égales par ailleurs, une valeur plus faible dans la bande SWIR traduit une plus grande teneur en eau. La combinaison des deux bandes NIR et SWIR soustrait les variations dues par la structure interne de la plante et la matière sèche. La précision dans la détermination de la teneur en eau n'en est qu'améliorée.

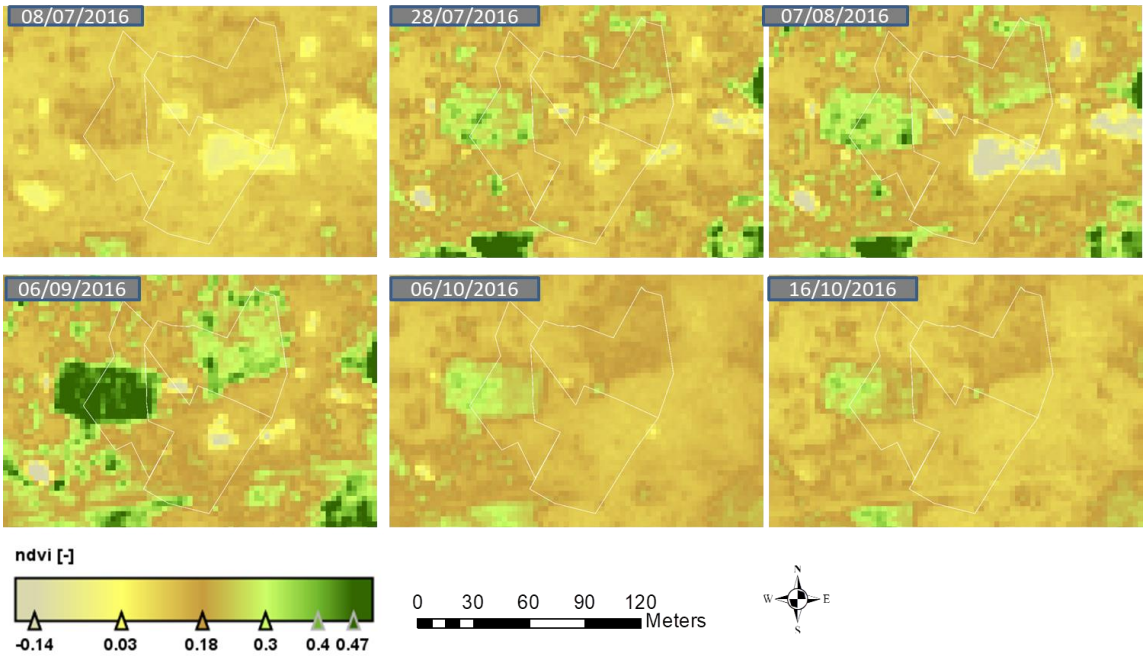
Le NDII apporte une information capitale sur l'état hydrique des cultures.

Récupération des données

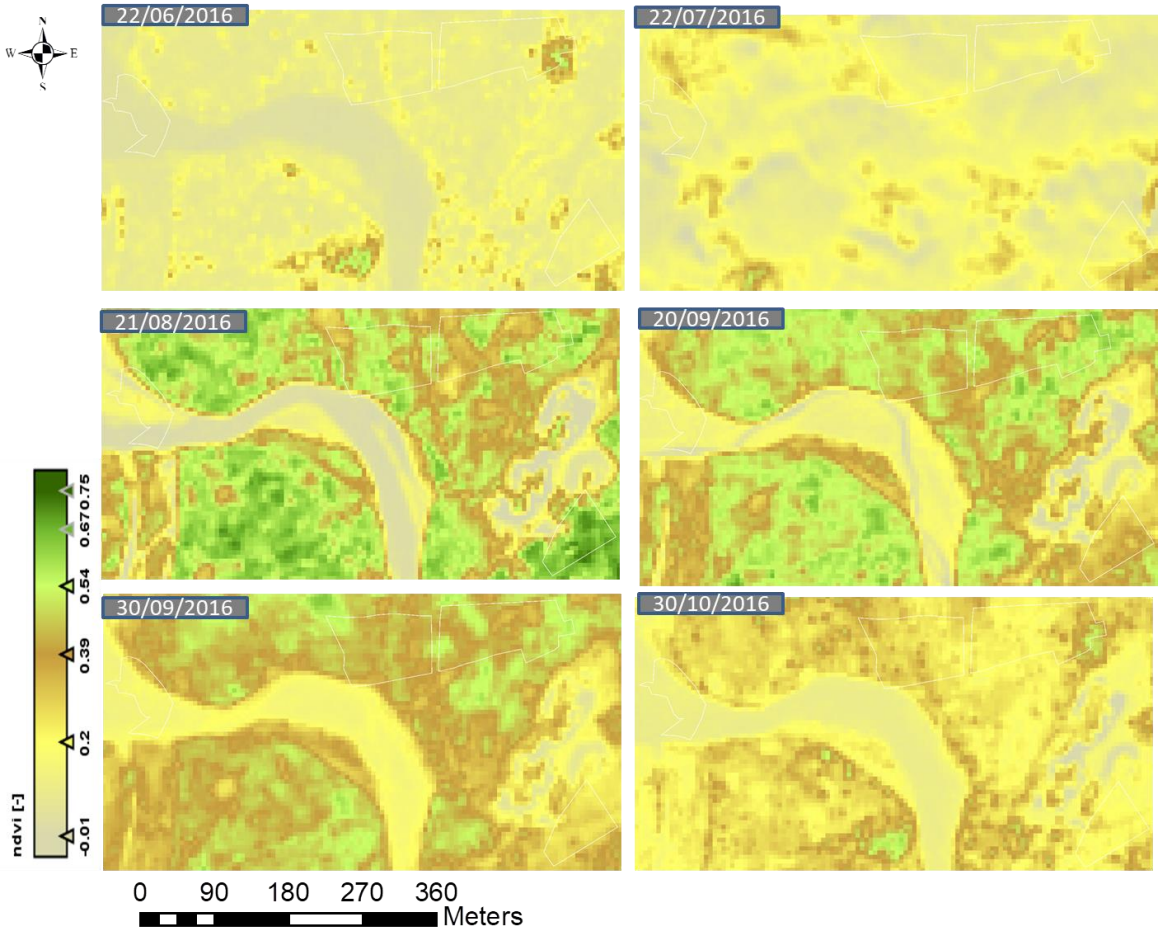
A partir des bandes d'indices NDVI et NDII calculées pour chaque extrait d'image des séries temporelles des régions de Banizoumbou, Sadore, Tarna et des « shapefile » de contour des champs, nous procédons à l'extraction des valeurs des pixels d'indice de chacun des champs dans le logiciel SNAP de l'ESA et nous exportons les données sous fichiers Excel pour analyses multivariées.

Caractérisation et suivi temporelle du NDVI

Les figures illustrent la distribution spatio-temporelle du NDVI au cours de la saison culturale sur les sites de Sadoré et Tarna. Ces figures donnent un aperçu de l'hétérogénéité spatio-temporelle du NDVI.



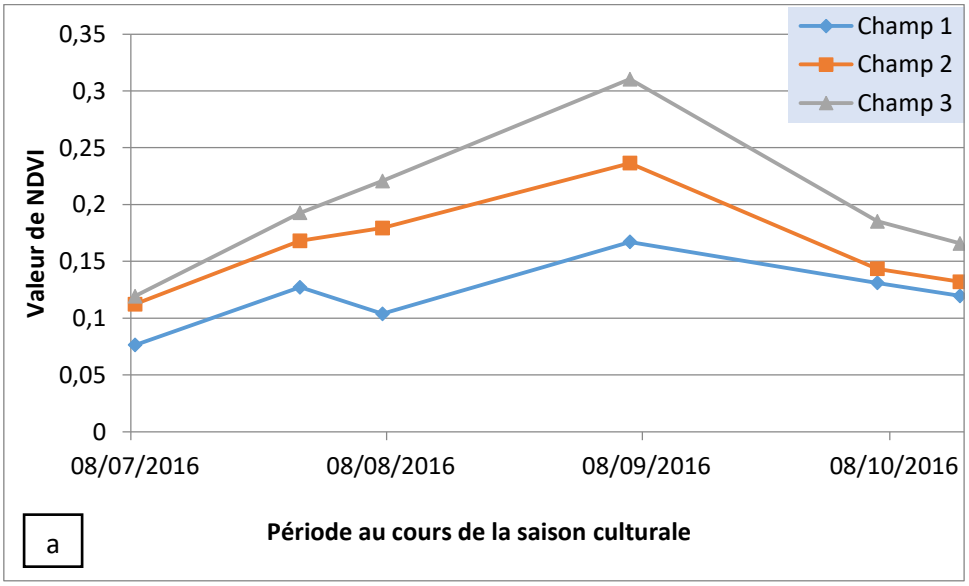
Caractérisation et suivi temporelle du NDVI sur le site de Sadoré



Caractérisation et suivi temporelle du NDVI sur le site de Tarna

L'analyse de ces figures révèlent l'hétérogénéité spatio-temporelle des indices de NDVI 'à l'intérieur et entre les champs agricoles et permet de constater à quel moment il existe une différenciation importante de la structure spatiale des cultures. Les valeurs de NDVI varient de 0,07 à 0,16 dans le champ 1, de 0,11 à 0,23 et enfin de 0,12 à 0,31 dans le champ 3. A Tarna, ces valeurs varient de 0,11 à 0,50 dans le champ 1, de 0,12 à 0,45 dans le champ 2, de 0,13 à 0,60 dans le champ 3 et enfin de 0,05 à 19 dans le champ sur alluvion du Goulbi. Les valeurs de NDVI obtenues confirment la tendance de l'augmentation du recouvrement végétal et son état de vigueur en fonction des stades phénologiques lors des relevés des EDS. L'analyse de ces figures couplée à celle de figure 71 permet de constater sur l'ensemble des champs et des sites, une tendance relativement similaire de l'évolution de la NDVI au cours de la saison des pluies. L'analyse de ces figures révèle trois phases différentes :

- Une phase où on assiste une augmentation du NDVI. Cette phase concerne les périodes de Juin à Juillet qui correspondent à l'installation des cultures et de leur levé ;
- Une phase de plateau entre les périodes d'Août et Septembre. Les valeurs du NDVI sont toujours plus importantes dans cette période. Ces deux périodes correspondent au plateau de croissance des cultures en place où elles atteignent leur développement maximal. A cette phase l'activité photosynthétique est maximale ;
- Une phase de senescence à partir du mois d'Octobre. On constate une chute du NDVI. Cette période correspond généralement à la récolte des cultures et à leur senescence.



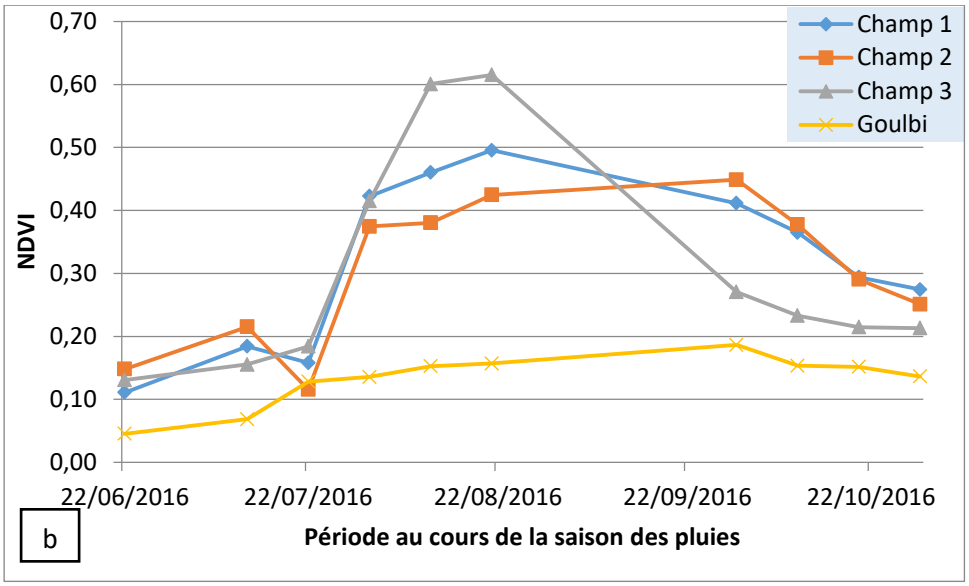


Figure 71 : Suivi temporel du NDVI (a) sur le site de Sadoré et (b) sur le site de Tarna

Caractérisation et suivi temporelle du NDWI

Les figures 74 et 75 illustrent la distribution spatio-temporelle de l'état hydrique des sols au cours de la saison culturale sur les sites de Sadoré et Tarna. L'analyse de ces figures indique une hétérogénéité spatio-temporelle de l'état hydrique à l'intérieur ou entre les champs agricoles au cours de la saison culturale.

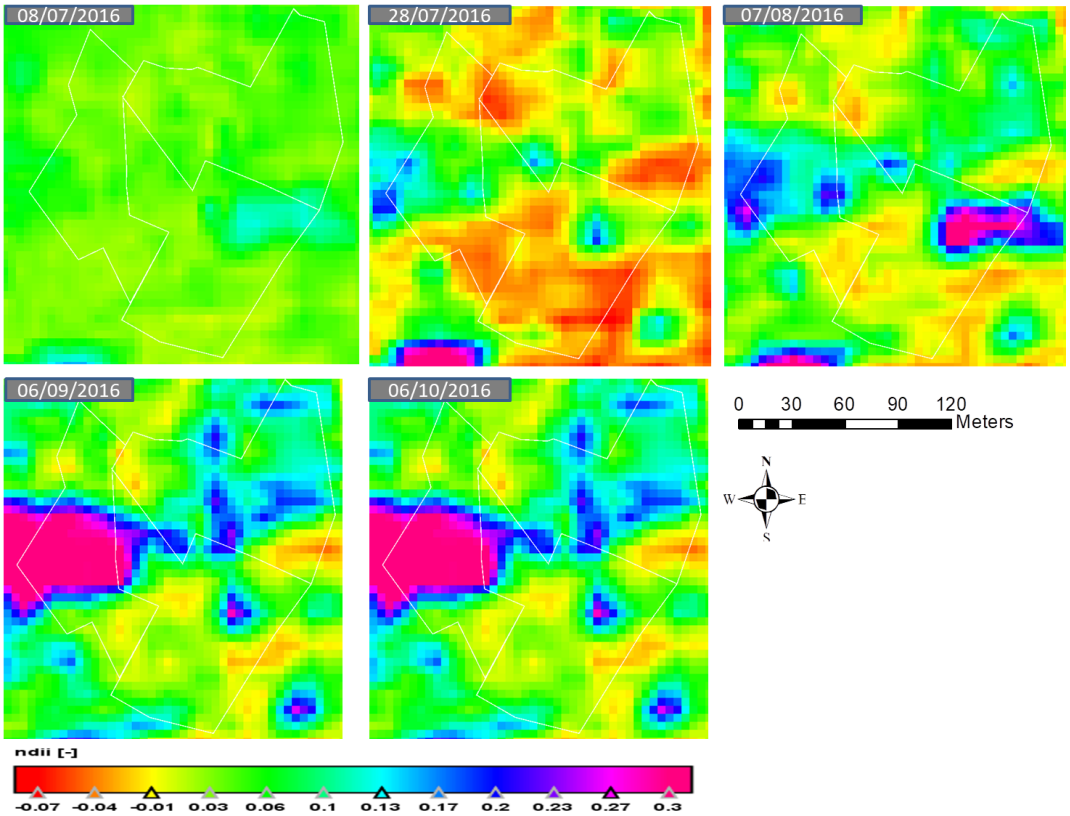


Figure74 : Caractérisation et suivi temporelle du NDWI sur le site de Sadoré

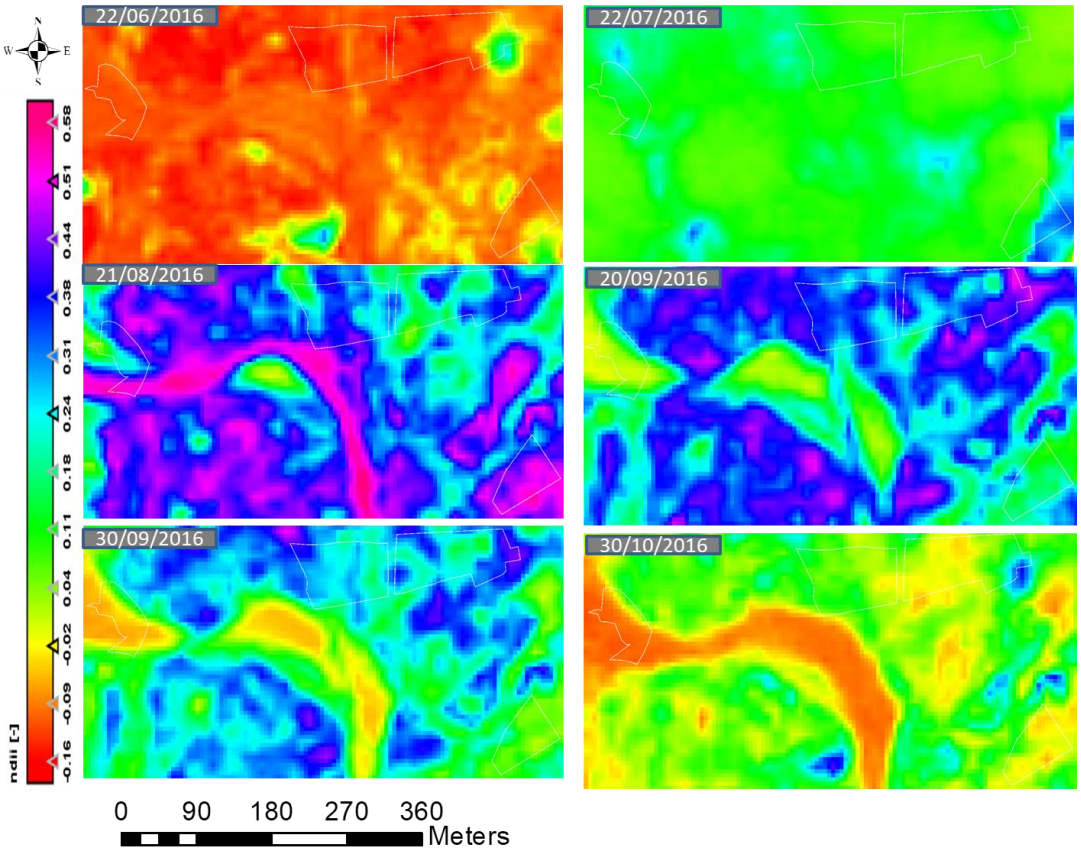
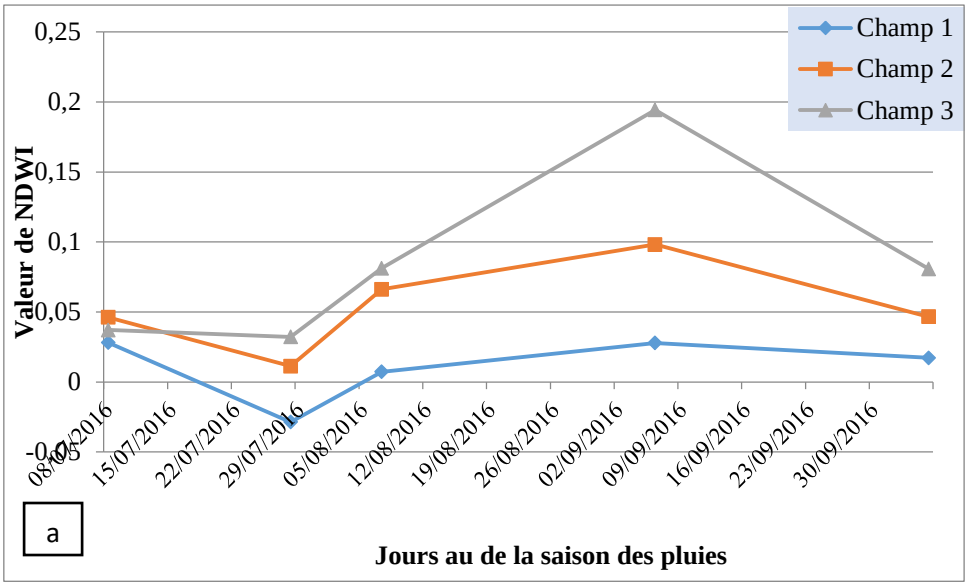


Figure 75 : Caractérisation et suivi temporelle du NDWI sur le site de Tarna

La figure 76 illustre le suivi temporel de l'évolution de l'état hydrique dans les champs agricoles au cours de la saison culturale. On constate sur l'ensemble des champs et des sites, une tendance relativement similaire de l'évolution de l'état hydrique des cultures au cours de la saison des pluies. Par ailleurs, on constate la variabilité inter champ de l'état hydrique. Les valeurs de NDWI varie de entre -0,03 à 0,03 dans le champ 1, de 0,01 à 0,1 dans le champ 2 et de 0,03à 0,2 dans le champ 3 sur le site de Sadoré. A tarna, il varie de -0,1 à 0,33 dans le champ 1, de -0,08 à 0,3 dans le champ 2, de -0,8 à 0,5 dans le champ 3 et enfin de -0,2 à 0,3 dans le champ sur alluvion du Goulbi. L'analyse de cette figure révèle trois périodes différentes :

- Une période marquée le stress hydrique ou période de sécheresse. Cette période correspond au début de la saison des pluies entre Juin et Juillet. On remarque une corrélation visuelle avec les données du NDVI (cf.fig 70 et 71) où l'activité photosynthèse est plus basse ;
- Une période relativement humide entre Août et Septembre. Les valeurs du NDVI sont toujours plus importantes dans cette période. On constate une corrélation visuelle avec le NDVI qui atteignent leur valeur maximale et qui présentent les fortes activités de photosynthèse ;

- Une période de décroissance de l'humidité ou une reprise de la sècheresse à partir du mois d'Octobre. Cette période correspond la baisse (cf.fig 70 et 71). Les cultures sont en générale à la fin de cycle, de leur récolte ou leur senescence.



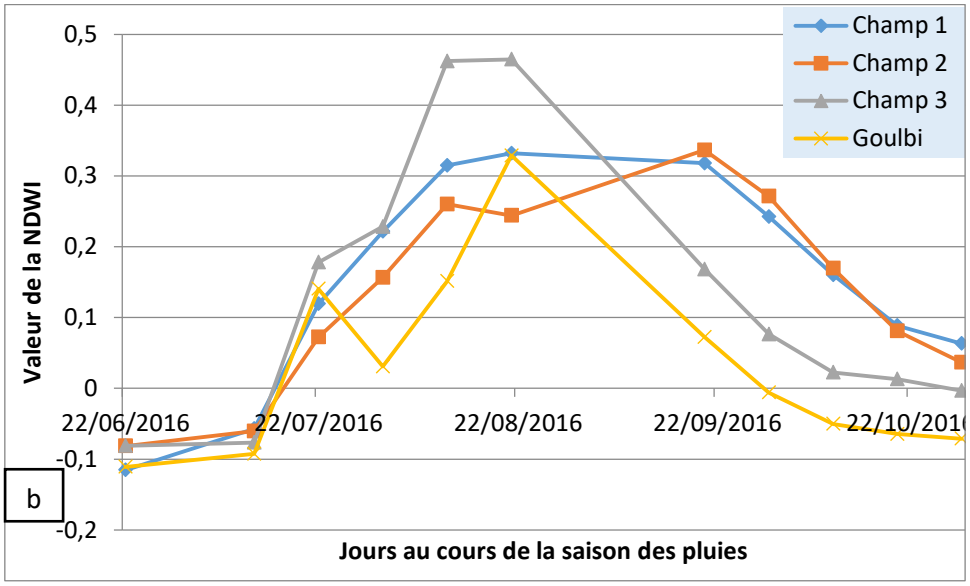
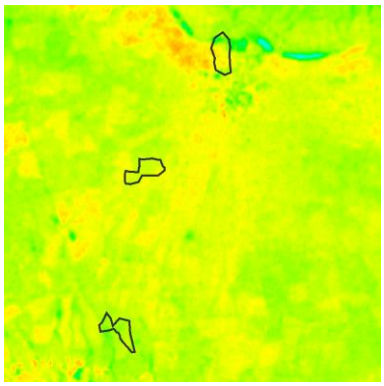
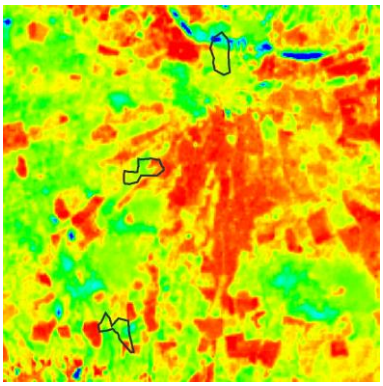


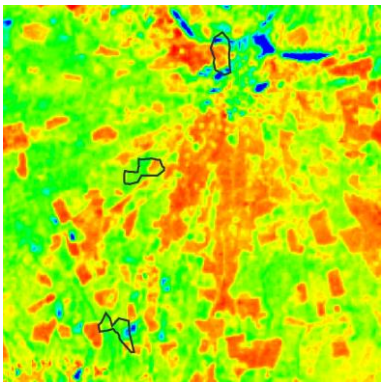
Figure 71 : Suivi temporel du NDWI (a) sur le site de Sadoré et (b) sur le site de Tarna



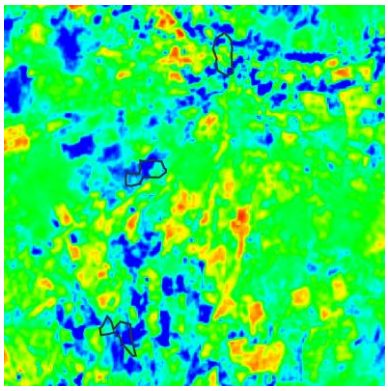
08/07/2016



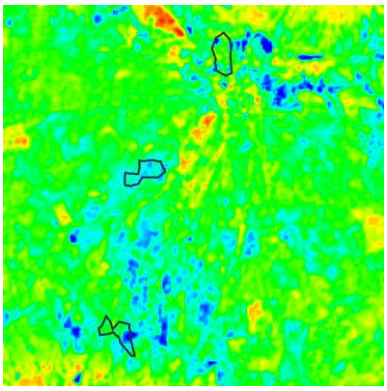
28/07/2016



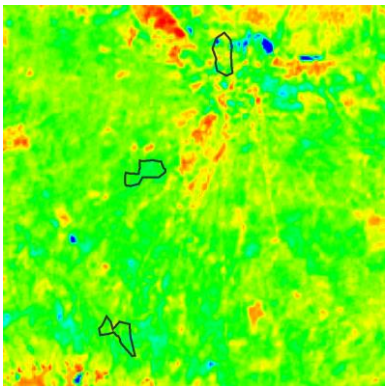
07/08/2016



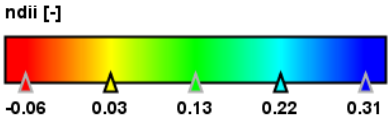
06/09/2016



06/10/2016

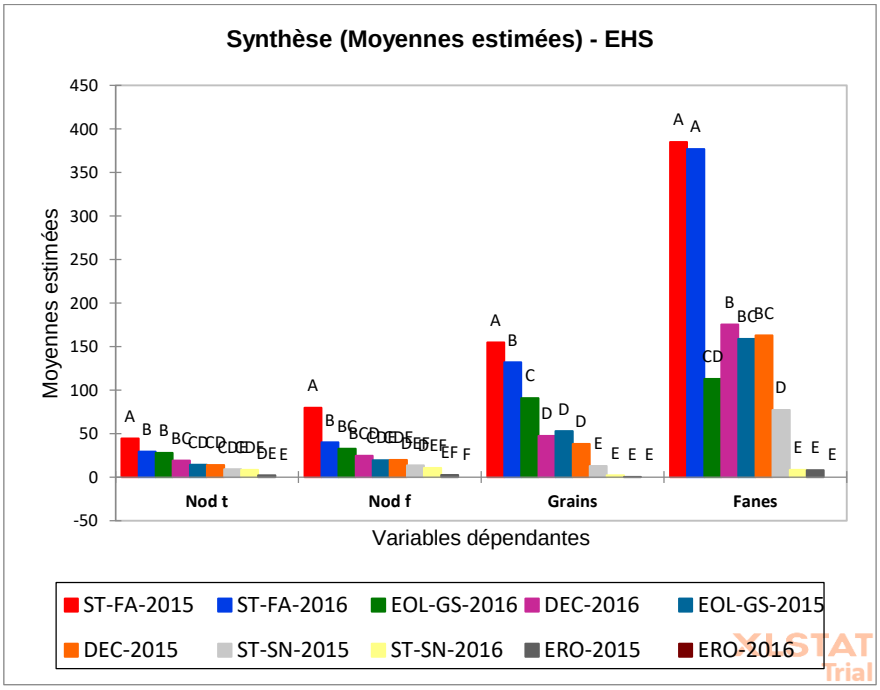


16/10/2016

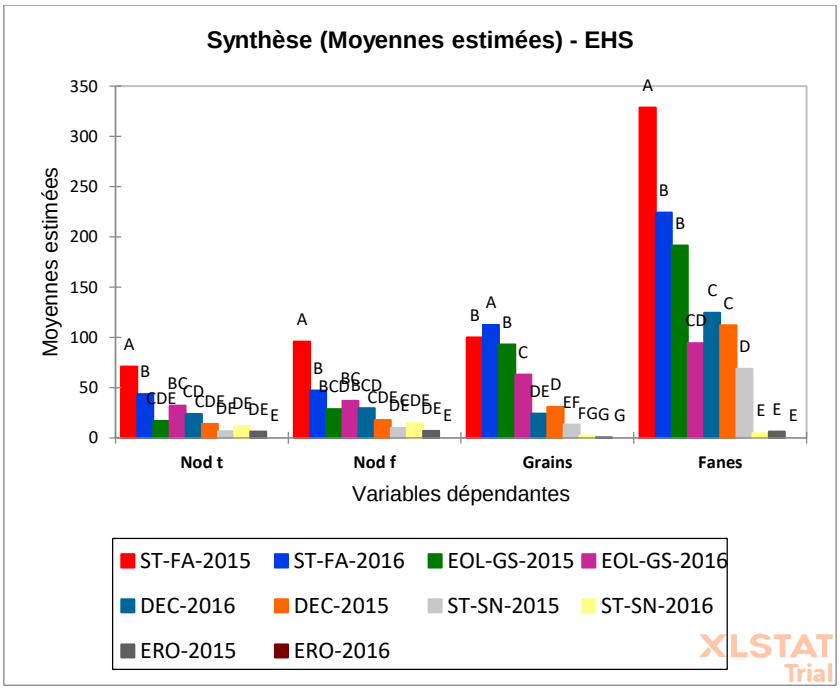


Annexe 3

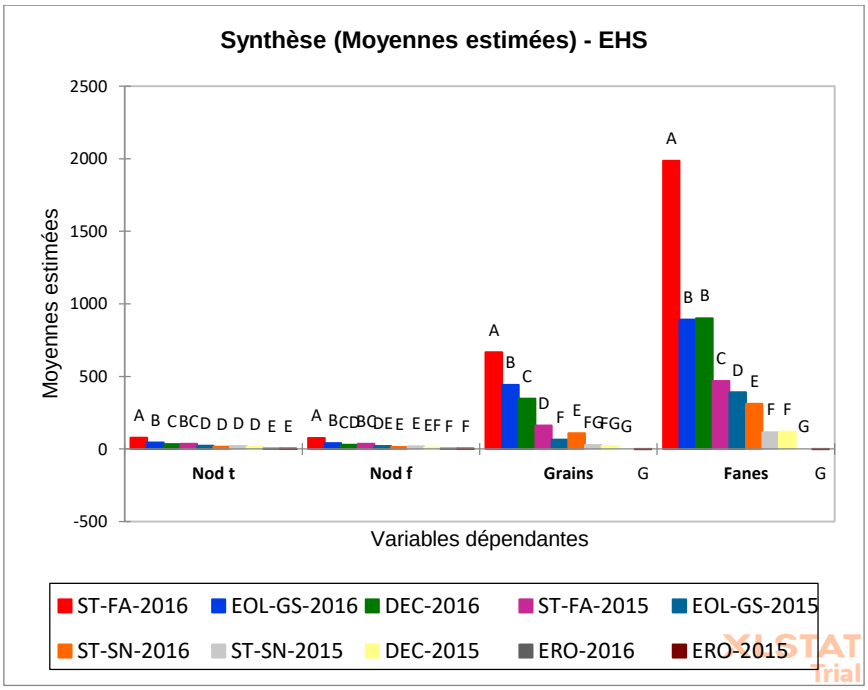
Variabilité interannuelle des paramètres de niébé en fonction des entités homogènes de surface du sol



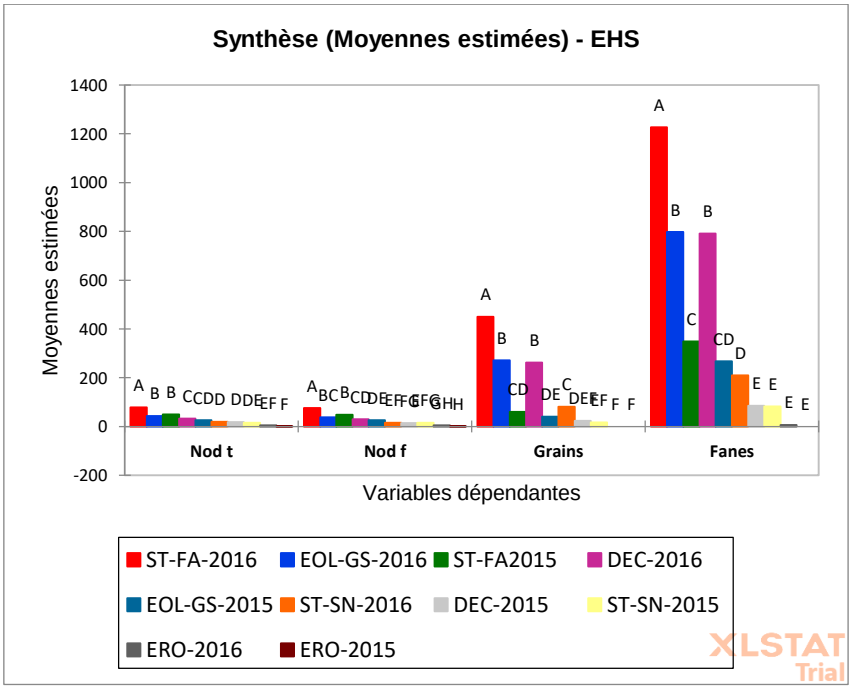
Variété DK sur le site de Banizoumbou Nod t : nodosités totales ; Nod f : nodosités fonctionnelles



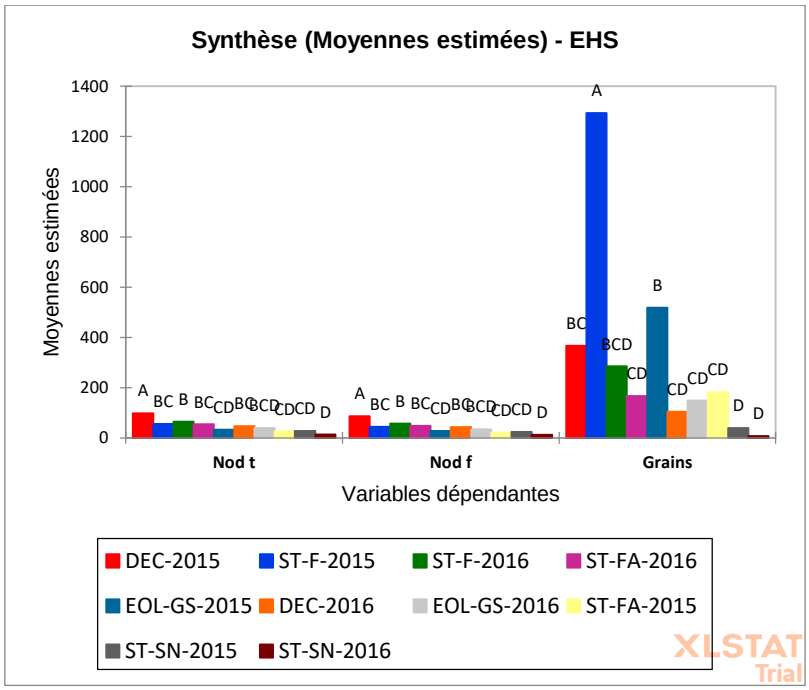
Variété KVX 61-1 sur le site de Banizoumbou Nod t : nodosités totales ; Nod f : nodosités fonctionnelles



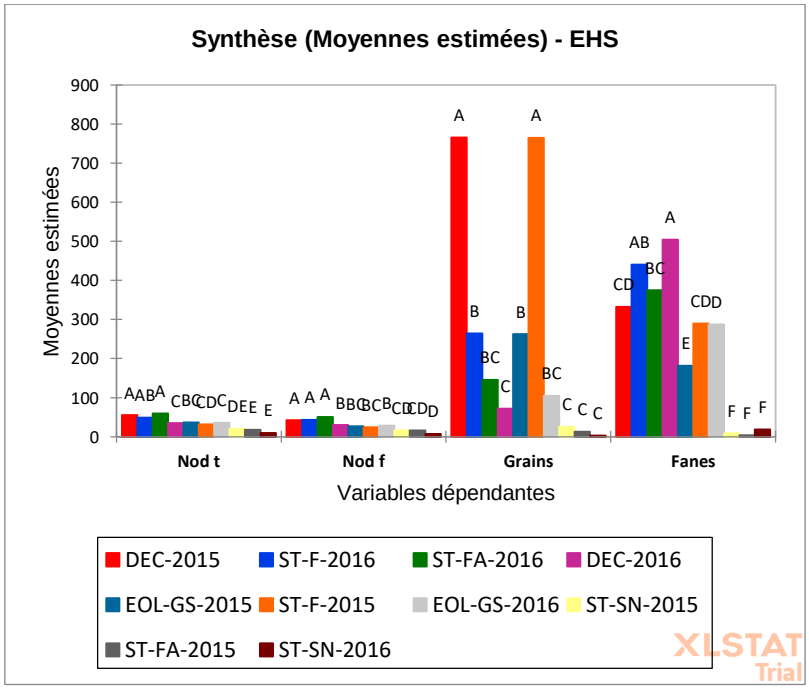
Variété LS sur le site de Sadoré Nod t : nodosités totales ; Nod f : nodosités fonctionnelles



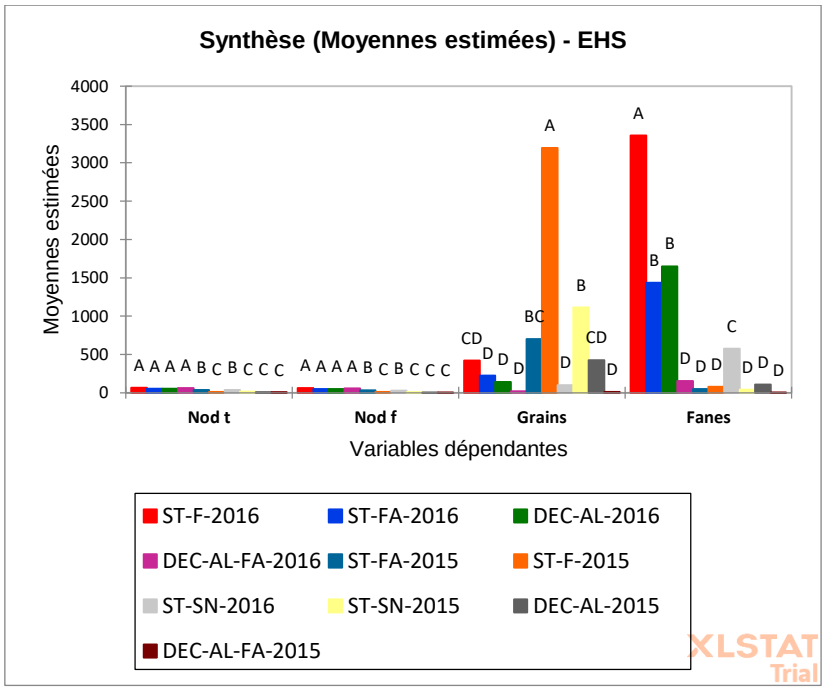
Variété KVX 61-1 sur le site de Sadoré Nod t : nodosités totales ; Nod f : nodosités fonctionnelles



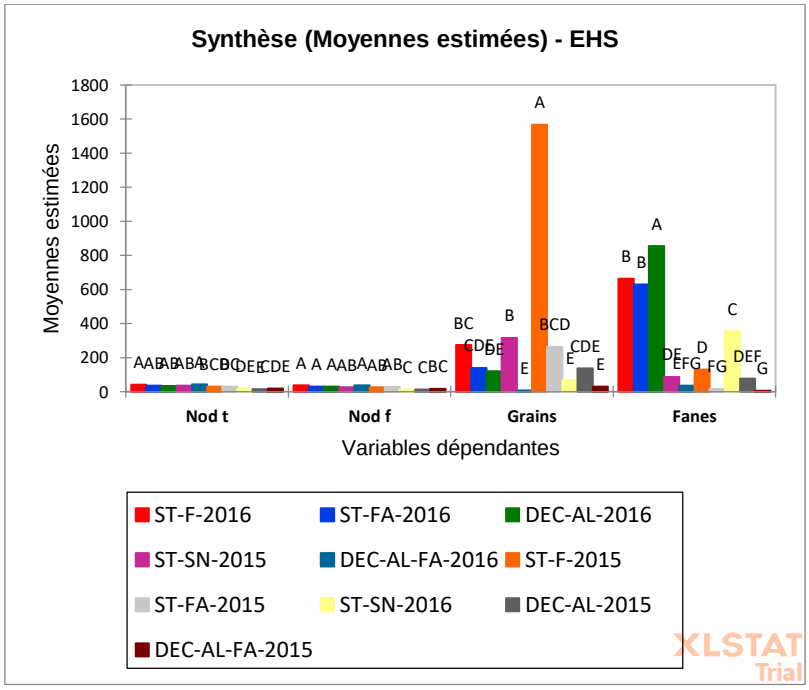
Variété Dan Zahi sur le site de Arraourayé Nod t : nodosités totales ; Nod f : nodosités fonctionnelles



Variété KVX 61-1 sur le site de Arraourayé Nod t : nodosités totales ; Nod f : nodosités fonctionnelles



Variété Bartha sur le site Tarna Nod t : nodosités totales ; Nod f : nodosités fonctionnelles



Variété KVX 61-1 sur le site Tarna Nod t : nodosités totales ; Nod f : nodosités fonctionnelles

Hétérogénéité spatiale et fonctionnelle de surface du sol et son influence sur la production du niébé dans les exploitations familiales au Niger

L'hétérogénéité est une caractéristique majeure de la surface du sol dans la zone sahélienne. Ce travail a été réalisé dans deux régions sahéliennes du Niger (Tillabéri et Maradi) présentant des conditions agro-écologiques, pédoclimatiques et socio-économiques différentes vis-à-vis de la culture du niébé. Son objectif est de comprendre l'influence de l'hétérogénéité spatiale et fonctionnelle de la surface du sol sur la production du niébé.

Notre approche méthodologique s'appuie sur des enquêtes semi-directives auprès des producteurs de niébé, la cartographie et la caractérisation de propriétés physico-chimiques des entités homogènes de surface (EHS), ainsi que le suivi des propriétés hydrodynamiques et des paramètres de rendements de niébé au cours de deux saisons culturales.

Les données collectées ont permis de rassembler les connaissances locales sur l'hétérogénéité de la surface du sol, la hiérarchisation des EHS selon leurs potentiels productifs et leurs niveaux de fertilité. Les formes d'hétérogénéité de surface identifiées dans le cadre de cette étude sont celles liées aux modifications des états de surface, notamment la formation des croûtes de surface, les changements dans la microtopographie et le couvert végétal. Elles regroupent les EHS liées aux croûtes d'érosion (ERO), aux croûtes de décantation (DEC), aux croûtes de dépôts éoliens autour de *Guiera senegalensis* (EOL-GS), aux croûtes structurales associées au houppier de *Faidherbia albida* (ST-FA), aux croûtes structurales associées aux fourmilières (ST-F), aux croûtes structurales (ST-SN), aux croûtes de décantation sur alluvion (DEC-AL), aux croûtes de décantation sur alluvion et sous le houppier de *Faidherbia albida* (DEC-AL-FA). La nature et l'occupation spatiale de ces EHS au sein des parcelles varient selon la région et la nature des sols. Les EHS les plus représentées sont liées aux croûtes structurales sur les sols ferrugineux tropicaux dans la région de Tillabéri et aux croûtes de décantation sur les sols alluviaux dans la région de Maradi. Les valeurs les plus élevées en carbone, azote, phosphore, bases échangeables et capacité d'échanges cationique ont été mesurées sur les entités homogènes de surface de types DEC sur sols ferrugineux tropicaux et DEC-AL-FA sur sols alluviaux. Les valeurs les plus faibles ont été obtenues sur les EHS ST-SN et ERO. Les valeurs de capacités de rétention en eau et de réserve en eau utile les plus élevées ont été enregistrées sur les EHS DEC. Les plus fortes valeurs de conductivité hydraulique à saturation (Ks) ont été mesurées sur les EHS EOL-GS (64,4 mm h^{-1}) et les plus faibles sur les EHS DEC (2,7 mm h^{-1}) et ERO (5,3 mm.h^{-1}). Ces valeurs décroissent en fonction du cumul de pluie reçu après sarclage et selon les dynamiques d'évolution des croûtes à la surface des différentes EHS au cours de 2 saisons culturales. La nodulation et les rendements en fanes et en grains des variétés de niébé sont plus importants sur ST-FA sur les sites de Tillabéri et sur ST-F sur les sites de Maradi. Les EHS ERO et ST-SN ont été identifiées comme étant des entités à contraintes, c'est-à-dire des entités avec le taux de nodulations et des rendements en fanes et en grains les plus faibles. L'application de la fumure organique sur ces surfaces à contraintes se traduit par l'amélioration de leurs propriétés physico-chimiques et hydriques, doublée d'une hausse significative de la nodulation et des rendements en fanes et en grains. Les rendements en fanes et en grains obtenus sur les entités à contraintes fumées sont supérieurs à ceux des entités non fumées. Ils dépassent largement ceux obtenus en milieu paysan au Niger qui varient entre 120 et 400 kg/ha selon les variétés.

Les résultats de cette étude pourront permettre une meilleure prise en compte de l'hétérogénéité de surface du sol dans la recherche des solutions pour optimiser la production du niébé sur les sols sahéliens avec de fortes hétérogénéités de surface.

Mots clés : Hétérogénéité de surface du sol, entité homogène de surface du sol, nodulation, rendement, niébé, propriétés hydriques des sols, Niger

Spatial and functional heterogeneity of soil surface and its influence on cowpea production on family farms in Niger

Heterogeneity is a major feature of soil surface in the Sahelian zone. This work was carried out in two Sahelian regions of Niger (Tillaberi and Maradi) with different agroecological, pedoclimatic and socio-economic conditions related to cowpea cultivation. It aimed to understand the influence of spatial and functional heterogeneity of soil surface on cowpea production.

Our methodological approach is based on semi-directive surveys conducted on cowpea producers, mapping and characterization of physicochemical properties of homogeneous soil surface, as well as field monitoring of hydrodynamic properties and cowpea yield parameters during two growing seasons. The collected data allowed gathering local knowledge on soil surface heterogeneity and ranking of homogeneous surface according to their productive potential and their fertility levels. The types of homogeneous surface identified in this study are those related to surface features changes, including crusting, changes in microtopography, and vegetation cover. They

comprised the homogeneous surface features related to erosion crusts (ERO), deposition crusts (DEC), wind erosion crusts around *Guiera senegalensis* (EOL-GS), structural crusts under the crown of *Faidherbia albida* (ST-FA), structural crusts associated with anthills (ST-F), structural crusts (ST-SN), deposition crusts on alluvial soils (DEC-AL) and deposition crusts on alluvial soils under the crown of *Faidherbia albida* (DEC- AL-FA). The nature and spatial arrangement of these homogeneous soil surfaces within plots vary by region and soil type. The most representative homogeneous soil surfaces are related to structural crusts on tropical ferruginous soils in Tillabéri and alluvial deposition crusts on alluvial soils in Maradi. The greatest values for carbon, nitrogen, phosphorus, exchangeable bases and cation exchange capacity were measured on DEC on tropical ferruginous soils and DEC-AL-FA on alluvial soils. The lowest values were obtained on ST-SN and ERO. The greatest values of soil water retention capacity and useful water reserve were recorded on DEC. The greatest values of saturation hydraulic conductivity (Ks) were measured on the EOL-GS (64.4 $mm.h^{-1}$) and the lowest on DEC (2.7 $mm.h^{-1}$) and ERO (5.3 $mm.h^{-1}$). These values decreased during both cropping seasons following the cumulative rainfall received after tillage and according to the dynamics of crusts evolution on the different homogeneous surface. The nodulation and residues and grains yields of cowpea varieties are higher on ST-FA at sites of Tillaberi and at ST-F at sites of Maradi. The ERO and ST-SN were identified as a types of homogeneous soil surface with constraints, i.e. with the lowest nodules number and residues and grains yields. Organic manure application on these surfaces resulted in the improvement of their physico-chemical and water properties, and also a significant increase in nodulation and residues and grains yields. The resulting yield exceed those obtained in a peasant environment in Niger which varies between 120 and 400 kg/ha depending on the variety.

The results of this study may help in integrating soil surface heterogeneity to optimize cowpea production on Sahelian soils.

Keywords: Heterogeneity of soil surface, homogeneous entity of soil surface, nodulation, yield, cowpea, properties of soils, Niger

Discipline : SCIENCES AGRONOMIQUES, BIOTECHNOLOGIES AGRO-ALIMENTAIRES

Spécialité : Agro pédologie

Université Abdou Moumouni de Niamey
Département Science du sol

BP : 10960 Niamey Niger

Université de Reims Champagne-Ardenne

GEGENAA - EA 3795