

UNIVERSITE CATHOLIQUE DE LOUVAIN
Faculté d'ingénierie biologique, agronomique et environnementale



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 par :*

Caroline Dandois Dutordoir

Promoteurs :

Pr. C. Bielders

Dr. B. Gérard

Lecteurs :

Pr. J. Dufey

Pr. J-F. Ledent

Louvain-la-Neuve
Année académique 2005-2006

UNIVERSITE CATHOLIQUE DE LOUVAIN
Faculté d'ingénierie biologique, agronomique et environnementale



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 par :*

Caroline Dandois Dutordoir

Promoteurs :

Pr. C. Bielders

Dr. B. Gérard

Lecteurs :

Pr. J. Dufey

Pr. J-F. Ledent

Louvain-la-Neuve
Année académique 2005-2006

Remerciements

Je voudrais remercier ici tous ceux qui m'ont aidé durant mes études et durant la réalisation de ce mémoire.

Un grand merci au Pr. Charles Bielders ainsi qu'au Dr. Bruno Gérard, pour leurs conseils pertinents et le temps qu'ils m'ont accordé. Merci également au Dr. Fatondji Dougbedji de l'ICRISAT ainsi qu'à Angélique Baclin et Alain Guibert de l'Institut de Statistiques de l'UCL pour leur aide précieuse.

Je remercie les personnes qui m'ont entouré et conseillé pendant la réalisation de mon stage au Niger en août et septembre 2005 et particulièrement Pierre Akponikpe et Laouali pour leur accueil. Merci à Tahiru, aux techniciens de l'ICRISAT et aux habitants des villages de Dantiandou, Banizoumbou, Bagoua et Kodey pour leur gentillesse à toute épreuve et les bons moments passés dans les champs de mil de l'essai. Merci à Nat d'avoir partagé avec moi cette aventure nigérienne.

Enfin, un grand merci à mes parents, qui m'ont soutenu et aidé durant toutes mes études, et à Fred, dont la patience sans faille et les encouragements ont permis que ce travail arrive à son terme.

Résumé

Le mil (*Pennisetum glaucum* (L.) R. Br.) est la plante alimentaire la plus cultivée dans la zone sahélienne du Niger. La pluviométrie et la faible fertilité des sols sont les principaux facteurs conditionnant le rendement de la culture du mil. Les sols cultivés sont sableux, contiennent peu de matière organique et de phosphore disponible et ont une faible capacité d'échange cationique. La culture permanente pratiquée sans restauration de la fertilité du sol provoque une diminution rapide de la teneur en éléments nutritifs et en matière organique ainsi qu'une acidification de la plupart des sols.

Etant donné le manque de disponibilité de fumier, plusieurs études ont mis en évidence que l'utilisation d'engrais minéraux, couplée à l'application d'engrais organiques est la solution phare pour satisfaire la demande alimentaire croissante sans aggraver la dépendance du pays vis-à-vis de l'aide internationale.

En vue de promouvoir l'utilisation par les agriculteurs de pratiques améliorées de gestion de la fertilité des sols, il est essentiel de pouvoir établir préalablement l'impact en conditions réelles de ces pratiques sur les rendements. C'est dans cet objectif qu'un essai en milieu paysan a été mis en place pour une durée de 3 ans dans 3 villages de la région du Fakara, au sud-ouest du pays. L'essai vise principalement la validation de la technique de placement d'engrais au poquet et la caractérisation de l'impact de pratiques indigènes de gestion de la fertilité. Il combine 3 variétés de mil (locale, ICMV IS 89305 et Zatih), 3 niveaux d'application d'engrais (témoin, DAP : phosphate diammonique et DAP + urée) et plusieurs pratiques de gestion des amendements organiques (transport de fumier et parcase) ainsi que leurs effets résiduels (un et deux ans après application).

Les rendements des parcelles où un parcase a été effectué dans l'année ont augmenté de 168 % (en grain) et de 176 % (en paille), tandis que la technique du transport de fumier a permis de doubler les rendements par rapport aux parcelles non fumées. L'effet du parcase sur les rendements dépend fortement de la pluviométrie utile et est marqué pendant trois saisons de culture consécutives, l'effet résiduel du transport de fumier jusqu'à la deuxième saison de culture. L'application d'engrais a permis d'augmenter les rendements en grain de 15 à 19 % mais nous recommandons l'application de DAP seul par rapport à l'application de DAP + urée car les rendements ne diffèrent pas significativement entre les deux types de fertilisation. L'effet de DAP a été d'autant plus marqué que le parcase et le transport de fumier étaient anciens. Les résultats indiquent que les agriculteurs gagneraient à appliquer DAP placé au poquet comme apport-relai en nutriments à partir de la 2^{ème}, voire de la 3^{ème} année après le parcase. Les variétés testées ont révélé différents avantages et inconvénients. La variété locale, sélectionnée par les agriculteurs depuis de nombreuses années et adaptée à la région, fournit les meilleurs rendements en paille. La variété améliorée ICMV IS 89305 permet une augmentation du rendement en grain de 12 % et une diminution de 10 % par rapport au rendement de la variété locale.

Dans la pratique, les quantités de fumier appliquées (estimées à 18 t ha⁻¹) sont hors de portée pour la plupart des agriculteurs sahéliens, généralement trop pauvres pour posséder suffisamment de bétail. D'autre part, les engrais importés sont chers et difficiles d'accès dans les campagnes. L'amélioration de l'accessibilité des intrants paraît essentielle pour parvenir à un accroissement durable des rendements en mil dans cette région.

Table des matières

INTRODUCTION.....	9
1^{ERE} PARTIE : CADRE DE L'ETUDE	11
1. CONTEXTE GLOBAL : LE NIGER.....	11
1.1. <i>Présentation</i>	11
1.2. <i>Climat</i>	11
1.3. <i>Ressources naturelles</i>	13
1.4. <i>Démographie</i>	15
1.5. <i>Economie</i>	16
1.6. <i>Agriculture, élevage et insécurité alimentaire</i>	16
2. CONTEXTE LOCAL : LA REGION DU FAKARA	19
2.1. <i>Présentation de la zone d'étude</i>	19
2.2. <i>Géologie, topographie et géomorphologie</i>	20
2.3. <i>Pédologie et caractéristiques agronomiques des sols</i>	22
2.4. <i>Agriculture</i>	26
2^{EME} PARTIE : PRATIQUES DE GESTION DE LA FERTILITE	33
1. AMENDEMENTS INORGANIQUES	33
1.1. <i>Phosphore</i>	35
1.2. <i>Azote</i>	38
1.3. <i>Potassium</i>	40
1.4. <i>Autres éléments minéraux</i>	41
1.5. <i>Effet des engrais sur l'efficacité de l'utilisation en eau</i>	41
2. AMENDEMENTS ORGANIQUES.....	42
2.1. <i>Matière organique du sol</i>	42
2.2. <i>Pratique de la jachère</i>	44
2.3. <i>Application de résidus de culture (mulching)</i>	45
2.4. <i>Agro-foresterie et association avec des légumineuses</i>	46
2.5. <i>Pratique du parcage (coralling)</i>	47
2.6. <i>Application de fumier transporté</i>	51
3. DENSITES DE SEMIS	52
4. VARIETES AMELIOREES	53
5. COMBINAISON DE TECHNIQUES	53
6. ADOPTION DES TECHNIQUES.....	54
7. LES MECANISMES DE RESISTANCE A LA SECHERESSE DU MIL.....	55
7.1. <i>Caractères morphologiques et physiologiques de résistance et évitement du mil à la sécheresse</i>	55
7.2. <i>Impact des pratiques culturales</i>	57
7.3. <i>Effet d'une sécheresse à différents moments du cycle</i>	58

7.4.	<i>Décomposition du rendement en grain</i>	59
3^{EME}	PARTIE : MATERIELS ET METHODES	60
1.	SITE DE L'EXPERIENCE ET CHOIX DES CHAMPS EXPERIMENTAUX	60
2.	DISPOSITIF EXPERIMENTAL	60
2.1.	<i>Les pratiques de gestion de la fertilité organique</i>	60
2.2.	<i>Les niveaux de fertilisation minérale</i>	62
2.3.	<i>Les variétés</i>	62
2.4.	<i>La parcelle élémentaire et la disposition de l'essai sur les champs</i>	63
3.	DISPOSITIF DE MESURES ET ANALYSE DE DONNEES	63
3.1.	<i>Pluviométrie</i>	63
3.2.	<i>Profils de teneur en eau</i>	64
3.3.	<i>Calcul de l'eau utile pour les plantes et bilan hydrique par parcelle</i>	66
3.4.	<i>Evaluation des apports de matière organique</i>	67
3.5.	<i>Développement de la culture</i>	67
3.6.	<i>Mesures de rendement à la récolte</i>	69
3.7.	<i>Evaluation des contraintes biotiques</i>	70
3.8.	<i>Propriétés physiques et chimiques du sol</i>	71
3.9.	<i>Analyse statistique</i>	72
4.	PRATIQUES CULTURALES ET CALENDRIER	75
4.1.	<i>Installation de l'essai</i>	75
4.2.	<i>Semis</i>	75
4.3.	<i>Sarclages et démariage</i>	76
4.4.	<i>Récolte</i>	76
4^{EME}	PARTIE : RESULTATS ET DISCUSSION	79
1.	PLUVIOMETRIE	79
1.1.	<i>Pluviométrie en 2003</i>	79
1.2.	<i>Pluviométrie en 2004</i>	79
1.3.	<i>Pluviométrie en 2005</i>	80
1.4.	<i>Pluviométrie utile et durée du cycle cultural</i>	82
2.	EVOLUTION DE L'EAU UTILE DISPONIBLE	82
3.	PROPRIETES PHYSICO-CHIMIQUES DES SOLS	86
3.1.	<i>Analyses chimiques des sols</i>	86
3.2.	<i>Analyse texturale des sols</i>	87
4.	EVALUATION DES APPORTS EN MATIERE ORGANIQUE	88
4.1.	<i>Apports résiduels en matière organique en 2003</i>	88
4.2.	<i>Apports résiduels en matière organique en 2004</i>	88
4.3.	<i>Apports résiduels en matière organique en 2005</i>	89
5.	ANALYSE DES CORRELATIONS ENTRE VARIABLES	91
6.	ANALYSE DES RENDEMENTS EN MIL EN 2003	95
6.1.	<i>Taux de survie au démariage et à la récolte</i>	95
6.2.	<i>Rendements en paille</i>	96

6.3.	<i>Nombre de talles et nombre d'épis par poquet</i>	98
6.4.	<i>Poids des grains par épi</i>	99
6.5.	<i>Rendements en grain</i>	100
6.6.	<i>Indice de récolte</i>	102
6.7.	<i>Nombres de poquets végétatifs et non matures par parcelle</i>	102
7.	ANALYSE DES RENDEMENTS EN MIL EN 2004	104
7.1.	<i>Taux de survie au démariage et à la récolte</i>	104
7.2.	<i>Rendements en paille</i>	108
7.3.	<i>Nombre de talles et nombre d'épis par poquet</i>	110
7.4.	<i>Poids des grains par épi</i>	112
7.5.	<i>Rendements en grain</i>	113
7.6.	<i>Indice de récolte</i>	116
7.7.	<i>Nombres de poquets végétatifs et non matures par parcelle</i>	116
8.	ANALYSE DES RENDEMENTS EN MIL EN 2005	118
8.1.	<i>Taux de survie au démariage et à la récolte</i>	118
8.2.	<i>Rendements en paille</i>	121
8.3.	<i>Nombre de talles et nombre d'épis par poquet</i>	124
8.4.	<i>Poids des grains par épi</i>	126
8.5.	<i>Rendements en grain</i>	127
8.6.	<i>Indice de récolte</i>	130
8.7.	<i>Nombres de poquets non matures et végétatifs</i>	130
9.	EVOLUTION DE LA PHENOLOGIE EN 2005	132
10.	EVALUATION DES CONTRAINTES BIOTIQUES EN 2003, 2004 ET 2005	134
11.	ANALYSE RECAPITULATIVE : EFFETS SIGNIFICATIFS SUR 3 ANS	136
11.1.	<i>Effet de l'année</i>	136
11.2.	<i>Effet du site</i>	141
11.3.	<i>Analyse des parcelles « témoins »</i>	142
11.4.	<i>Effet de la strate de fertilité</i>	145
11.5.	<i>Effet de l'engrais chimique</i>	148
11.6.	<i>Interaction strate de fertilité organique × fertilisation inorganique</i>	149
11.7.	<i>Effet de la variété</i>	150
	CONCLUSIONS	153
	BIBLIOGRAPHIE	156

Table des figures

1. Situation géographique (source : FAO, 2001)	11
2. Principales zones agro-climatiques	12
3. Température, ETP et pluviométrie moyennes mensuelles enregistrées à Niamey - 13°30'N 2°08'E (1931-1990) (Sivakumar et al., 1993).....	13
4. Carte des sols du Niger (FAO, 2001).....	14
5. Evolution de la superficie totale cultivée pour les céréales au Niger de 1990 à 2000	17
6. Evolution des rendements en mil (source : FAO, 2000) et de la pluviométrie annuelle au Niger de 1990 à 2000 (source : Ali et al., 2003).....	18
7. Localisation du canton du Fakara (source : Hiernaux et Ayantunde, 2004).....	19
8. Délimitation de la zone d'étude et pluviométrie annuelle en 2003 (d'après ICRISAT, 2003).....	20
9. Coupe schématique illustrant les éléments géomorphologiques.....	21
10. Carte des unités topographiques, géomorphologiques et texturales des sols du Fakara et carte dérivée de l'aptitude potentielle à la mise en culture (gradient de fertilité) (source : Hiernaux et Ayantunde, 2004)	25
11. Femmes Peul dans un champ de mil à Kodey	26
12. <i>S. hermonthica</i> parasite le mil.....	29
13. Représentation schématique du calendrier des pratiques agro-pastorales	30
14. Auréole de fertilité autour d'un village (source : Gérard-Delfosse)	30
15. Clôtures en paille de mil et greniers à grain à Tigo Tégui.....	31
16. Flux de N dans les champs cultivés et les pâturages du Sahel (les rectangles sont les inputs, les ovales sont des outputs) (source : Powell et al., 1996).....	43
17. Cycle des nutriments dans le système agro-pastoral sahélien (adapté de Harris, 2002).....	45
18. Dispositif expérimental superposé à une photo aérienne du site de Kodey, le 17 septembre 2003. Chacun des 5 blocs (strates) représente une pratique de gestion de fertilité organique différente. (ICRISAT, 2003).....	61
19. Représentation schématique d'une strate de pratique de gestion de la fertilité	61
20. Pluviomètre installé à Bagoua	64
21. Sonde à neutrons 503 DR Hydroprobe utilisée en 2005.....	64
22. Schéma d'une sonde à neutrons 503 DR Hydroprobe (Bacchi et al., 2000).....	65
23. Lignes du temps schématiques des dates de semis et de récolte du mil	76
24. Schéma d'une parcelle (100 m ²). Chaque croisement indique l'emplacement.....	77
25. Pluviométrie cumulée en 2003, 2004 et 2005.....	81
26. Pluviométrie utile totale par site et année	82
27. Durée du cycle cultural par site et année	82
28. Eau utile par strate et par site (à gauche) et comparaison entre pluviométrie cumulée (histogramme) sur la période entre deux mesures de sonde à neutron et eau utile (♦) moyenne par site (à droite) en 2004	84
29. Eau utile par strate et par site (à gauche) et comparaison entre pluviométrie cumulée (histogramme) sur la période entre deux mesures de sonde à neutron et eau utile (♦) moyenne par site (à droite) en 2005.....	85

30. Teneur en argile (moyennes et écart-types) en fonction de la profondeur.....	88
31. Apports résiduels en matière organique fécale (MOF) (kg ha ⁻¹) en 2004.....	89
32. Apports résiduels en matière organique végétale (MOV) (kg ha ⁻¹) en 2004.....	89
33. Apports résiduels en matière organique fécale (MOF) (kg ha ⁻¹) en 2005.....	90
34. Apports résiduels en matière organique végétale (MOV) (kg ha ⁻¹) en 2005.....	91
35. Graphe « boxplot ^s » du taux de survie au démariage (%) illustrant l'interaction strate x variété ..	96
36. Rendements en paille par strate de fertilité et par site (2003).....	97
37. Rendements en grain par site et par strate de fertilité (2003).....	101
38. Graphe « boxplot » du taux de survie au démariage (%) illustrant l'interaction strate x variété..	106
39. Graphe « boxplot » du taux de survie au démariage (%) illustrant l'interaction strate x fertilisation x variété.....	107
40. Graphe « boxplot » du taux de survie à la récolte (%) illustrant l'interaction strate x fertilisation	107
41. Rendements en paille par strate de fertilité et par site (2004).....	108
42. Graphe « boxplot » du rendement en paille (kg ha ⁻¹) illustrant l'interaction strate x fertilisation	110
43. Rendements en grain par strate de fertilité et par site (2004).....	114
44. Graphe « boxplot » du rendement en grain (kg ha ⁻¹) illustrant l'interaction strate x fertilisation.	115
45. Graphe « boxplot » du taux de survie à la récolte (%) illustrant l'interaction strate x fertilisation	120
46. Graphe « boxplot » du taux de survie à la récolte (%) illustrant l'interaction fertilisation x variété	121
47. Rendements en paille par strate de fertilité et par site (2005).....	122
48. Graphe « boxplot » du rendement en paille (kg ha ⁻¹) illustrant l'interaction strate x fertilisation	124
49. Rendements en grain par strate de fertilité et site (2005).....	128
50. Graphe « boxplot » du rendement en grain (kg ha ⁻¹) illustrant l'interaction strate x fertilisation.	130
51. Evolution de la phénologie de la tige principale du mil au cours de la saison	132
52. Nombre moyen de poquets atteints par le mildiou par parcelle en fonction du niveau de fertilisation minérale et de la variété du mil	135
53. Nombre moyen de plants shibra par parcelle en fonction du niveau de fertilisation minérale et de la variété du mil.....	135
54. Occurrence moyenne de <i>S. hermonthica</i> par parcelle en fonction du niveau de fertilisation minérale et de la variété du mil	135
55. Rendements moyens en paille (a) et en grain (b) en fonction du site et de la pluviométrie utile annuelle.....	137
56. Rendements moyens en paille (a) et en grain (b) en fonction du site et de la durée du cycle cultural	137
57. Rendements moyens en paille (a) et en grain (b) des parcelles sans engrais et de strate non fumée (Témoin + NF) en fonction du site et de la pluviométrie utile annuelle.....	138
58. Différence entre rendements moyens en paille (a) et en grain (b) de traitements choisis et rendements des parcelles sans engrais et de strate non fumée (Témoin + NF) en fonction du site et de la pluviométrie utile annuelle.....	139
59. Taux de survie au démariage et à la récolte en fonction de la pluviométrie utile (démariage) (récolte) et en fonction de la différence de pluviométrie entre le démariage et la récolte (récolte2).....	140

60. Rendements moyens en paille et en grain toutes années confondues et par site (barres d'erreur = s.e.d pour les comparaisons entre années)	141
61. Nombre de poquets morts, végétatifs, non matures et récoltés dans les parcelles non fumées, non fertilisées par engrais et de variété locale	143
62. Rendements moyens dans les parcelles non fumées, non fertilisées par engrais et de variété locale	143
63. Poids des grains par épi et nombre d'épis par poquet* dans les parcelles non fumées, non fertilisées par engrais et de variété locale (*non mesuré à Kodey en 2003).....	144
64. Rendements moyens toutes années confondues par strate de fertilité (barres d'erreur = s.e.d. sauf FT-1 et FT-2).....	145
65. Rendements moyens en paille en fonction de la MOF résiduelle mesurée. Chaque point représente une moyenne par strate.	147
66. Rendements moyens en grain en fonction de la MOF résiduelle mesurée. Chaque point représente une moyenne par strate.	147
67. Rendements moyens toutes années confondues par niveau de fertilisation (barre d'erreur = s.e.d.)	149
68. Graphe « boxplot » du rendement en grain moyen de 2003 à 2005 (kg ha ⁻¹) illustrant l'interaction strate x fertilisation	150
69. Différence de rendement en grain par strate entre parcelles témoins et fertilisées par DAP	150
70. Rendements moyens par variété (barre d'erreur = s.e.d.)	151
71. Différence de rendement en paille avec la variété locale en fonction de la pluviométrie annuelle utile	152
72. Différence de rendement en grain avec la variété locale en fonction de la pluviométrie annuelle utile	152
73. Différence de rendement en paille avec la variété locale en fonction de la pluviométrie annuelle utile (sans la pluviométrie à Kodey en 2004)	152

Liste des tableaux

1. Propriétés physiques et chimiques des sols du Fakara (source : Hiernaux et Ayantunde, 2004) ...	23
2. Classification des sols par situation topographique (source : Hiernaux et Ayantunde, 2004).....	23
3. Principaux engrais (source : IFA et FAO, 2001)	35
4. Calendrier des opérations culturales et pluviométrie (DOY = day of the year, jour de l'année)....	78
5. Détermination des périodes sèches après semis en 2003, des pluies ≤ 7 mm au sein d'une période sèche et des phases de développement correspondantes (phase 1: 0-50 JAS, phase 2: 50-75 JAS, phase 3 : >75 JAS).....	79
6. Détermination des périodes sèches après semis en 2004, des pluies ≤ 7 mm au sein d'une période sèche et des phases de développement correspondantes (phase 1: 0-50 JAS, phase 2: 50-75 JAS, phase 3 : >75 JAS).....	80
7. Détermination des périodes sèches après semis en 2005, des pluies ≤ 7 mm au sein d'une période sèche et des phases de développement correspondantes (phase 1: 0-50 JAS, phase 2: 50-75 JAS, phase 3 : >75 JAS).....	80
8. Durée de la période sèche supplémentaire au Tableau 6 et phase de développement correspondante (phase 1: 0-50 JAS, phase 2: 50-75 JAS, phase 3 : >75 JAS).....	83
9. Résultats des analyses chimiques des sols (échantillons prélevés le 2 juin 2003).....	86
10. Résultats d'analyse texturale (moyennes de 0 à 210 cm de profondeur).....	87
11. Disparition de matière organique fécale (MOF) entre 2004 et 2005	90
12. Coefficients de corrélation de Spearman supérieurs à $ 0,5 $ et à $ 0,7 $ (en gris) en 2003, 2004 et 2005	93
13. Taux de survie au démariage et à la récolte en fonction des strates de fertilité (2003)	95
14. Nombre d'épis poquet ¹ et nombre de talles poquet ¹ par niveau de fertilisation (2003)	98
15. Paramètres de rendement et rendements en grain moyens par strate (2003)	100
16. Paramètres de rendement et rendement en grain moyens par niveau de fertilisation (2003).....	101
17. Nombres de poquets végétatifs et non matures par strate de fertilité (2003).....	102
18. Nombres de poquets végétatifs et de poquets non matures	103
19. Comparaison des variables mesurées par rapport à 2003	104
20. Taux de survie au démariage et à la récolte par niveau de fertilisation (2004)	105
21. Nombre de talles et d'épis par poquet par strate de fertilité (2004).....	111
22. Nombre de talles et d'épis par poquet par niveau de fertilisation (2004)	111
23. Poids des grains par épis par niveau de fertilisation (2004)	112
24. Paramètres de rendement et rendements en grain moyens par strate (2004)	113
25. Comparaison par site des nombres de poquets végétatifs et non matures en 2004 et 2003.....	116
26. Nombres de poquets végétatifs et non matures par strate de fertilité (2004).....	116
27. Nombres de poquets végétatifs et non matures par niveau de fertilisation et par variété (2004) .	117
28. Comparaison des variables mesurées par rapport à 2003 et à 2004.....	118
29. Taux de survie au démariage et à la récolte par site (2005).....	119
30. Taux de survie au démariage et à la récolte par niveau de fertilisation (2005)	119
31. Nombre de talles et d'épis par poquet par site (2005)	124
32. Nombre de talles et d'épis par poquet par strate de fertilité (2005).....	125
33. Nombre de talles et d'épis par poquet par niveau de fertilisation (2005)	125

34. Poids des grains par épis par site (2005).....	126
35. Poids des grains par épis par niveau de fertilisation (2005)	126
36. Paramètres de rendement et rendements en grain moyens par strate (2005).....	128
37. Nombres de poquets végétatifs et non matures par site (2005)	130
38. Nombres de poquets végétatifs et non matures par strate de fertilité (2005).....	131
39. Nombres de poquets végétatifs et non matures par niveau de fertilisation et par variété (2005) .	131
40. Régressions linéaires relatives aux graphes de la Figure 58.....	139
41. Moyennes par année ($p < 0,0001$ pour toutes les variables).....	141
42. Récapitulatif des moyennes par année et par site	142
43. Moyennes par strate de fertilité toutes années confondues.....	148
44. Moyennes par niveau de fertilisation toutes années confondues	148
45. Moyennes par variété toutes années confondues	151

Introduction

L'accroissement rapide de la population observé ces dernières décennies au Niger a conduit à l'augmentation des surfaces cultivées, à l'expansion de l'agriculture vers des terres marginales et au renforcement de la pression sur les terres par les processus de surpâturage et déforestation. La pauvreté, la dégradation de l'environnement, les aléas climatiques et la faible productivité agricole sont entrelacés et menacent toujours plus la sécurité alimentaire. Pour améliorer cette situation, la croissance agricole doit passer par une augmentation de la productivité des sols plutôt que par l'extension spatiale de la superficie cultivée et la mise en culture de terres marginales.

Le mil (*Pennisetum glaucum* (L.) R. Br.) est la plante alimentaire la plus cultivée dans la zone sahélienne du Niger. La pluviométrie et la faible fertilité des sols sont les principaux facteurs conditionnant le rendement de la culture du mil. Les sols cultivés sont sableux, contiennent peu de matière organique et de phosphore disponible et ont une faible capacité d'échange cationique. La culture permanente pratiquée sans restauration de la fertilité du sol provoque une diminution rapide de la teneur en éléments nutritifs et en matière organique ainsi qu'une acidification de la plupart des sols. La fertilité des sols sous culture peut seulement être maintenue par une gestion intégrée des éléments nutritifs pour les plantes. Cette gestion implique un recyclage efficace des matériaux organiques comme les résidus de culture ou le fumier, en combinaison avec des fertilisants minéraux et en utilisant la rotation ou l'association avec des légumineuses.

Etant donné le manque de disponibilité de fumier, plusieurs études ont mis en évidence que l'utilisation d'engrais minéraux, couplée à l'application d'engrais organiques est la solution phare pour soutenir la demande alimentaire croissante sans aggraver la dépendance du pays vis-à-vis de l'aide alimentaire. Dans la zone soudano-sahélienne, les agriculteurs appliquent actuellement moins de 5 kg d'engrais minéraux $\text{ha}^{-1}\text{an}^{-1}$ (Buerkert et al., 2001). Les engrais importés sont chers et difficiles d'accès dans les campagnes. L'absence de subsides, l'augmentation des coûts énergétiques et le risque climatique sont autant de facteurs qui appellent à des recommandations techniques prudentes et spécifiques en fonction des sites pour garantir des bénéfices durables à l'utilisation d'intrants.

En vue de promouvoir l'utilisation par les agriculteurs de pratiques améliorées de gestion de fertilité des sols, il est essentiel de pouvoir établir préalablement l'impact en conditions réelles de ces pratiques sur les rendements. C'est dans cet objectif qu'un essai en milieu paysan a été mis en place dans la région du Fakara. L'essai vise principalement la validation de la technique de placement d'engrais au poquet et la caractérisation de l'impact de pratiques endogènes de gestion de la fertilité (transport de fumier et parage).

L'application localisée d'engrais minéral au poquet lors du semis du mil a généré des résultats prometteurs dans des essais menés depuis 1995 en station expérimentale et en milieu paysan (Muehlig-Versen et al., 2003 et Muehlig-Versen et al., 1997). Cette technique attira immédiatement l'attention de plusieurs organisations de développement installées au Niger. Le Projet Intrans de la FAO (au sein du Ministère Nigérien du Développement Agricole) fut

particulièrement intéressé par la diffusion de cette technologie dans le milieu agricole nigérien. Depuis 1999, le système d'application d'engrais minéral au poquet au taux de 4 kg P ha⁻¹ a fait l'objet de plus de 5000 essais dans les régions de Niamey, Maradi et Zinder. Ces essais étant sous la supervision d'agriculteurs locaux, une grande partie de la variabilité de la réponse au P semblait due aux types de sols et aux différences d'environnement expérimental, sans toutefois que ces différences aient été quantifiées. C'est pour tester cette nouvelle technologie dans un environnement plus contrôlé et présentant moins de variabilité qu'un essai de validation fut installé dans trois sites de la région du Fakara.

Cet essai s'insère dans le cadre d'un projet financé par la DGCD (Direction Générale de la Coopération au Développement belge) et coordonné par l'ICRISAT (Institut de Recherche sur les Cultures des Tropiques Semi-Arides) en collaboration avec d'autres organismes tels que la FAO et l'UCL. Le projet vise le développement de systèmes d'aide à la décision à l'usage des décideurs, ONG et projets de développement, afin de mieux cibler les propositions d'intensification et de diversification agricole pour les petits agriculteurs. L'essai combine 3 variétés de mil, 3 niveaux d'application d'engrais inorganique et plusieurs pratiques de gestion des amendements organiques (transport de fumier et parage) ainsi que leurs effets résiduels (un et deux ans après application).

L'analyse des résultats fournis par l'essai doit permettre d'expliquer les différentes réponses des rendements en fonction de la variété de mil, des paramètres bio-physiques et des différentes pratiques de gestion de la fertilité. Cette analyse doit également être la base de la formulation de recommandations qui viseront à relier les pratiques de gestion de fertilité des sols avec les risques de sécheresse tout en prenant en compte la question de la disponibilité de la fumure organique.

Après une présentation du Niger et de la zone du Fakara, une synthèse des connaissances actuelles des pratiques de gestion de la fertilité en région sahélienne est décrite. Le dispositif expérimental et les mesures effectuées sont ensuite détaillés. La quatrième partie présente les résultats. Ceux-ci sont illustrés et discutés par année avant d'être synthétisés dans une analyse combinée effectuée sur les résultats des 3 années de l'essai. Enfin, une conclusion reprend les principales remarques, observations et perspectives.

1^{ère} partie : Cadre de l'étude

1. Contexte global : Le Niger

1.1. Présentation

La République du Niger est un pays enclavé dans le cœur de l'Afrique de l'Ouest (Figure 1). Sa superficie totale est de 1 267 000 km². Le Niger comprend le district de la capitale (Niamey) et sept départements, eux-mêmes subdivisés en districts et communes. Le français est la langue officielle, mais le haoussa est la langue commerciale locale. D'autres langues africaines telles que le fulfulde, le tamachek et le zerma sont aussi largement employées (FAO, 2005).



Figure 1. Situation géographique (source : FAO, 2001)

1.2. Climat

Le Niger présente un climat de type sahélien semi-aride à aride.

a) **Les précipitations**

La pluviométrie diminue selon un fort gradient Sud-Nord qui est associé au mouvement saisonnier de la zone de convergence intertropicale. La pluviométrie moyenne

annuelle s'abaisse d'environ 1 mm par km du Sud vers le Nord divisant ainsi le pays en quatre zones climatiques (FAO, 2005) :

- La **zone saharienne** (65 % du territoire national) avec des précipitations inférieures à 100 mm par an ;
- La **zone sahélo-saharienne** (12 % du territoire national) avec des précipitations annuelles comprises entre 100 et 300 mm ;
- La **zone sahélo-soudanienne** (13 % du territoire national) avec des précipitations annuelles variant de 300 et 600 mm ;
- La **zone soudanienne** (1 % du territoire national) qui reçoit entre 600 et 800 mm par an.

La Direction de la Météorologie Nationale du Niger (2003) définit les mêmes zones mais place la limite supérieure de la zone saharienne à l'isohyète 150 mm (Figure 2).

Cette zonation latitudinale des conditions climatiques affecte de manière significative la vie socio-économique du pays et détermine les différents écosystèmes (voir les types de sols et de végétation ainsi que la répartition de l'agriculture et de l'élevage ci-dessous).

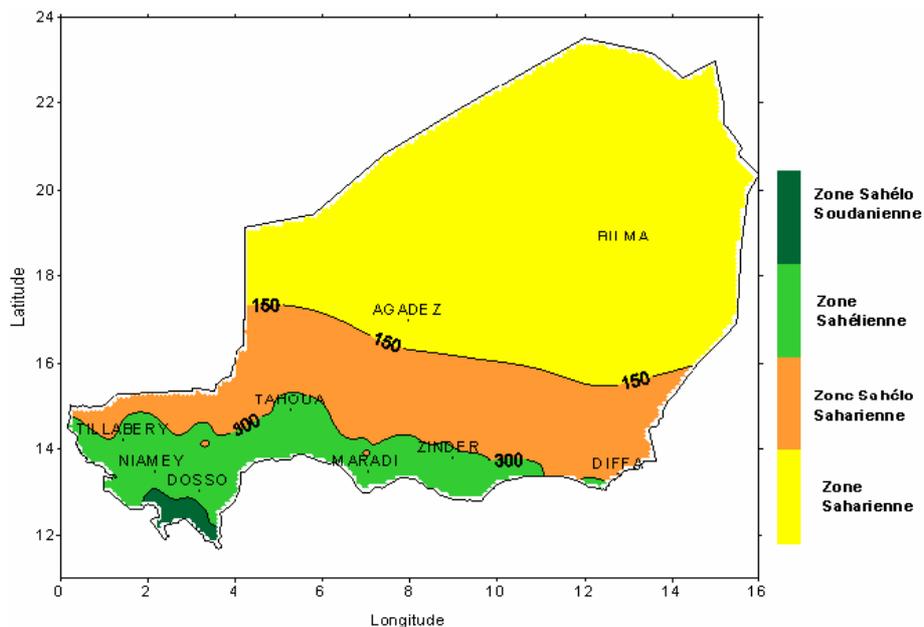


Figure 2. Principales zones agro-climatiques
(source : Direction de la Météorologie Nationale du Niger, 2003)

La zone sahélienne montre un climat semi-aride déterminé par une longue saison sèche d'octobre à mai et une courte saison de pluies de mai-juin à septembre (FAO, 2005).

L'évapotranspiration potentielle (ETP) atteint 2 à 3 m par an et le bilan pluviométrique annuel par rapport à l'ETP est déficitaire sur l'ensemble du pays. La Figure 3 indique le bilan pluviométrique mensuel et les températures enregistrées à Niamey. Les pluies montrent une forte variabilité intra- et inter-annuelle qui constituent une des contraintes de la production agricole locale (Figure 6 p.18). Sivakumar et al. (1993) ont calculé un coefficient de variation de 22 % pour la pluviométrie annuelle totale à Niamey (moyenne de 545 mm pour la période 1931-1990).

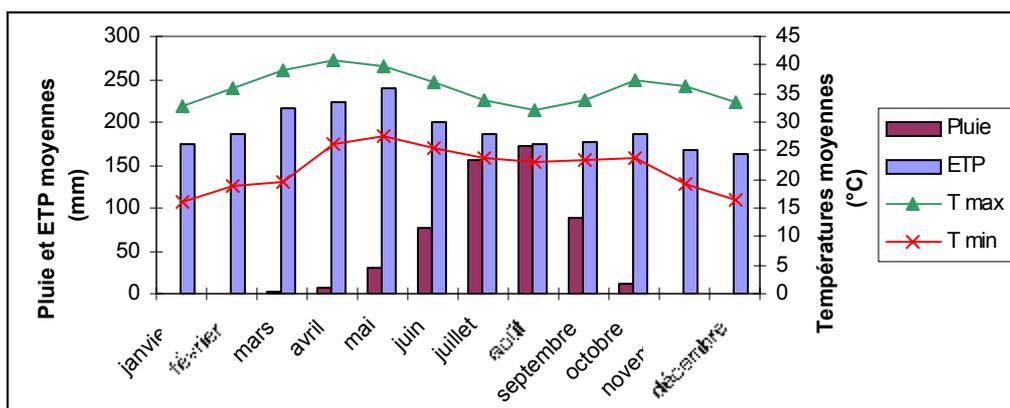


Figure 3. Température, ETP et pluviométrie moyennes mensuelles enregistrées à Niamey - 13°30'N 2°08'E (1931-1990) (Sivakumar et al., 1993)

b) Températures et humidité

La température annuelle moyenne est de 29°C pour tout le pays. Les maxima moyens mensuels sont observés durant les mois de mars, avril et mai (40 à 42°C). Deux périodes de baisse des températures existent : durant la saison des pluies (32°C en moyenne en août) et en décembre et janvier avec 34°C en moyenne. Ces deux derniers mois constituent la période des nuits les plus fraîches avec une moyenne de 14 à 15°C.

L'humidité relative est corrélée avec l'alternance du passage des masses d'air du front inter-tropical : la moyenne mensuelle est de 17 % en février et de 75 % en septembre (pour la période 1951-1982).

c) Les vents

L'harmattan, vent chaud et sec du nord-est, souffle régulièrement pendant la saison sèche. Fortement chargé en poussières issues du Sahara, il peut déposer ces particules sur son passage.

Durant la saison des pluies, les vents du sud-ouest accompagnent les perturbations provoquées par la remontée du front intertropical. Ces vents de « mousson ouest-africaine » sont parfois érosifs et peuvent être accompagnés de tempêtes convectives du sud-est responsables d'un important transfert de matière.

1.3. Ressources naturelles

a) Hydrographie

Mis à part quelques bassins plus ou moins permanents et quelques cours d'eau saisonniers, le réseau hydrographique principal du Niger consiste en un fleuve principal, le

Niger, une rivière plus petite, le Komadougou Yobé, et le bassin du lac Tchad. Le Niger traverse le pays dans le sud-ouest sur 550 km. Le Komadougou Yobé marque la frontière entre le Niger et le Nigéria sur 140 km. A l'extrême est, le lac Tchad se retire de plus en plus et il n'existe plus à l'intérieur des frontières du Niger depuis 2004 (FAO, 2005).

b) Les types de sols

Les principaux types de sols au Niger sont repris dans la Figure 4.

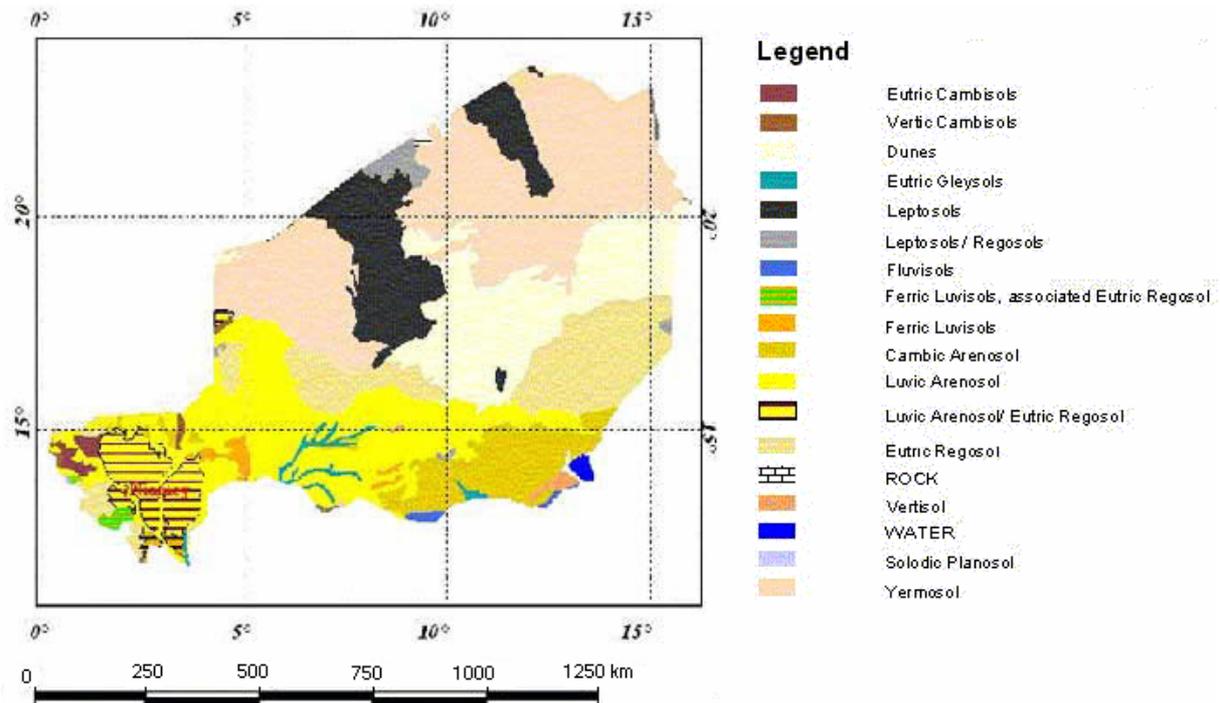


Figure 4. Carte des sols du Niger (FAO, 2001)

Dans la **zone saharienne**, les carences en eau et le faible développement de la végétation inhibent la formation des sols. Les vents forts emportent les particules les plus fines. L'horizon A est peu ou pas développé et le contenu en matière organique est en général inférieur à 0,5 % dans les 40 cm supérieurs (FAO, 2001).

La **zone sahélienne** est une large bande de sols sablonneux traversant le Niger du Mali jusqu'au Tchad. Les sols légèrement altérés (*Cambic Arenosols*) à l'est, montrent de fines couches d'accumulation argileuse au centre et à l'ouest (*Luvic Arenosols*). Lorsque les précipitations, et donc l'altération, deviennent plus régulières, les sols commencent à montrer un horizon supérieur de couleur claire enrichi en matière organique, et un horizon inférieur tirant sur le rouge en raison de la plus forte concentration en fer. Les *Arenosols* ont une faible capacité de rétention de l'eau mais ils sont perméables et faciles à travailler. Leur fertilité naturelle et leur capacité d'échange cationique sont peu élevées et les carences en éléments mineurs fréquentes. Ces sols s'érodent facilement sous l'action du vent et de l'eau dès qu'il n'y a plus de végétation. Ils conviennent aux cultures agricoles peu exigeantes telles que le mil et le niébé.

Sur les terrasses entre le fleuve Niger et le *dallol* (rivière non permanente) Bosso et le *dallol* Maouri, dans la **zone sahélo-soudanienne**, les *Arenosols* sont parfois associés aux *Regosols*, des sols très peu développés situés sur une roche mère peu compacte.

c) Les types de végétation

Le Niger couvre deux zones géobotaniques : la zone saharo-sindienne dans l'extrême nord et la zone soudano-zambézienne dans la majorité du pays (FAO, 2001).

La **zone saharo-sindienne** est caractérisée par une pluviosité faible et irrégulière. La végétation dominante des plaines consiste en un pâturage discontinu (souvent qualifié de "steppe"), principalement limité aux dépressions.

La **zone soudano-zambézienne** contient la ceinture sahélienne dans le nord et la ceinture soudanienne dans le sud.

- La **ceinture sahélienne** montre une végétation typique de la steppe, où la couche ligneuse s'amenuise du sud au nord et la strate herbacée est composée principalement de graminées annuelles. Cette ceinture peut être subdivisée en deux secteurs : le secteur **sahélo-saharien** au nord de l'isohyète 350 mm, connu pour être une zone de transhumance car la culture du mil elle-même y est très difficile et le secteur **sahélo-soudanien** au sud, zone essentiellement sédentaire d'élevage extensif et de culture du mil (bien que le bétail soit encore très nombreux, il part en transhumance vers le nord durant la saison des pluies afin de ne pas endommager les cultures et de profiter des pâturages saisonniers). Dans le secteur sahélo-soudanien, les arbres sont plus fréquents et on trouve aussi des bosquets. La végétation de steppe persiste sur les sols sableux des vallées sèches. Les plateaux présentent des formations typiques des savanes, les bosquets occupant la plus grande partie du sud de la ceinture sahélienne et s'étendant sur les surfaces latéritiques couvertes d'un sol mince. Arbres et arbustes de *Combretaceae*, *Tiliaceae* et *Mimosaceae* forment ce que l'on appelle la "brousse tigrée", où s'alternent des bandes de végétation ligneuse et de sol nu (Hiernaux et Gérard, 1999).
- La **ceinture soudanienne** est relativement restreinte au Niger, et se cantonne essentiellement à l'ouest du pays et au sud de Niamey. Elle comprend une végétation de savane caractérisée par une strate herbacée continue où dominant les graminées vivaces et par une strate ligneuse renfermant des arbustes et des arbres. Elle est davantage boisée que le Sahel.

1.4. Démographie

En 2003, le Niger compte 13,1 millions d'habitants dont 87 % vivant en zone rurale et 49 % en-dessous de 15 ans. La densité de population s'élève à 10 habitants/km² mais la population est concentrée à 90 % dans la bande d'environ 200 km de large au sud du territoire le long de la frontière du Nigeria. L'espérance de vie moyenne à la naissance est de 44,3 ans

et le taux de mortalité infantile est de 154 morts pour 1 000 naissances. Le taux de croissance annuel de la population est de 3,3 % (2005). Les femmes nigériennes mettent au monde en moyenne 7,9 enfants (période 2000-2005).

Concernant la période 2002-2003, le taux brut de scolarisation dans le primaire, secondaire et supérieur atteint seulement 21 % des enfants en âge d'être scolarisés. Le taux d'alphabétisation atteint 14 % pour les plus de 15 ans et 20 % pour les 15-24 ans.

63 % de la population vit actuellement en dessous du seuil de pauvreté (période 1990-2002). L'indice de développement humain de 0,281 atteint par le Niger en 2005 place celui-ci en dernière position dans le classement des pays. Avec un PIB par habitant de 232 \$ US, le Niger est un des pays les plus pauvres du monde (PNUD, 2005).

Sauf mention contraire, les données citées ci-dessus proviennent de 2003.

1.5. Economie

Un climat particulièrement dur, des caractéristiques géographiques inhospitalières et une situation d'enclavement total, telles sont les réalités sous-jacentes de l'économie du Niger. Cependant, la petite agriculture familiale et l'élevage contribuent approximativement à 40 % du PIB (juste après les services, qui représentent 42 %) et les trois-quarts de la main d'œuvre sont employés dans ce secteur (en 2003). S'appuyant principalement sur l'agriculture et l'élevage, l'économie du pays est très largement à la merci des variations climatiques. Le Niger exploite des mines d'étain, d'or et d'uranium. De grands dépôts d'uranium sont situés dans le nord du Niger et ceux-ci comptent pour environ 75 % dans les recettes des exportations. On exploite aussi des mines de sel en petites quantités. L'industrie se limite essentiellement au conditionnement alimentaire et au bâtiment, les entreprises manufacturières sont presque toutes très petites. Le bois de feu et autres combustibles traditionnels comptent pour 80 % dans la consommation énergétique du pays (FAO, 2005).

1.6. Agriculture, élevage et insécurité alimentaire

a) **Agriculture**

Moins 4 % des terres sont cultivables, 9 % sont des pâturages permanents et seulement 2 % sont des forêts et boisements. L'agriculture est limitée au nord par l'isohyète 350 mm, au-delà duquel la production de mil cesse pratiquement. Les zones sahélo-soudanienne et soudanienne du Niger sont considérées comme potentiellement sédentaires (contrairement aux zones du nord où l'on trouve avant tout une activité nomade). Le mil (*Pennisetum glaucum*) et le sorgho (*Sorghum bicolor*) sont les cultures extensives traditionnelles, mais on y cultive également du niébé (*Vigna unguiculata*), de l'arachide (*Arachis hypogaea*) ainsi que du coton. Les dépressions créées par des cours d'eau anciens ou récents sont utilisées pour les cultures maraîchères ou les arbres fruitiers. Le riz est cultivé autour du fleuve Niger et de la

rivière Komadougou. Le développement des cultures irriguées demeure modeste et est limité principalement à la production de riz provenant des zones irriguées le long du fleuve Niger. Celle-ci est insuffisante pour les besoins de la population (estimés à 200 000 t) et le riz constitue le premier produit d'importation (FAO, 2001).

Le niébé, le coton et l'arachide sont cultivés pour l'exportation mais seul le niébé, peu consommé localement et exporté de façon informelle vers les marchés sous-régionaux (Nigeria, Bénin), constitue une production de réelle importance. Le mil est cultivé pour la consommation locale ainsi que le sorgho, le manioc, les légumineuses, les oignons, le riz, la canne à sucre et quelques primeurs. La pêche est pratiquée sur le fleuve Niger et les prises sont consommées ou vendues localement.

L'agriculture bénéficie des engrais organiques qui maintiennent le sol fertile aux alentours des lieux d'habitation mais l'augmentation de la production en mil provient avant tout de l'augmentation des superficies cultivées (Figure 5). Chaque année 70 000 à 80 000 ha de nouvelles terres sont occupés par l'agriculture aux dépens des forêts et de l'élevage (FAO, 2005). Le défrichement et l'exploitation du bois réduit considérablement la végétation originale : Niamey, la capitale, requiert à elle seule plus de 11 000 t de bois de feu par an (FAO, 2001). En outre, les jachères diminuent et les rotations sont ramenées à 2-3 ans, ce qui réduit ultérieurement la fertilité des sols.

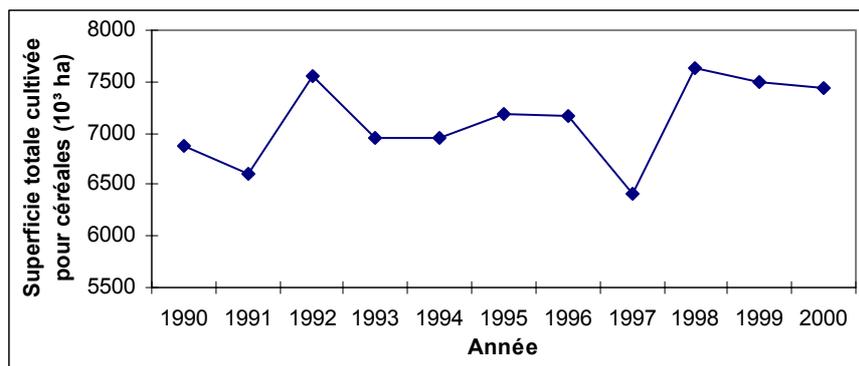


Figure 5. Evolution de la superficie totale cultivée pour les céréales au Niger de 1990 à 2000 (source : FAO, 2000)

b) Elevage

En raison de la croissance de la population et de la sédentarisation de groupes autrefois nomades, la terre agricole entame les pâturages. Cela conduit à un surpâturage de ces derniers et se traduit souvent par des querelles foncières. Au nord de l'isohyète 350 mm, l'élevage est en général la première source de revenus. Mais ce dernier contribue aussi aux moyens de subsistance des agropasteurs vivant au sud de cet isohyète, et constitue une assurance contre les aléas climatiques et économiques. Ces dernières années, l'élevage s'est déplacé de plus en plus vers la zone agropastorale. Dans le sud-ouest du Niger tout particulièrement, les activités d'embouche et de production laitière s'intensifient de plus en plus.

L'élevage contribue à hauteur de 35 % au PIB agricole et à 12 % du PIB (en 1995). Plus d'un million de personnes travaillent à plein temps dans l'élevage (FAO, 2001). La production animale nigérienne s'appuie sur la pâture extensive mais le risque climatique, l'étendue et la qualité des pâturages, de même que les contraintes sanitaires et économiques, constituent des freins notables à sa performance. La situation de précarité favorise deux types d'élevage: les camélidés et les petits ruminants.

c) Production céréalière déficitaire

En 2004, la production totale en mil s'élevait à 2 500 000 t, constituant deux tiers de la production céréalière du pays. Le Niger est le troisième pays producteur de mil après l'Inde et le Nigéria. Le rendement en grain moyen du mil avoisine 400 kg ha⁻¹.

Le caractère aléatoire des pluies, les attaques de pestes (notamment les acridiens) et la pauvreté des sols sont autant de facteurs limitant la productivité agricole. Les fortes variations interannuelles des niveaux de rendements soulignent la dépendance du pays vis-à-vis de la pluviométrie (Figure 6). De 1983 à 2000, le bilan de la production céréalière disponible par rapport aux besoins a été déficitaire 14 années sur 17, à l'exception des années 1988, 1998 et 1999. L'équilibre est notamment recherché à travers les importations (représentant 12 à 14 % des disponibilités alimentaires dont plus de 50 % en provenance des pays voisins) et l'aide alimentaire (FAO, 2005).

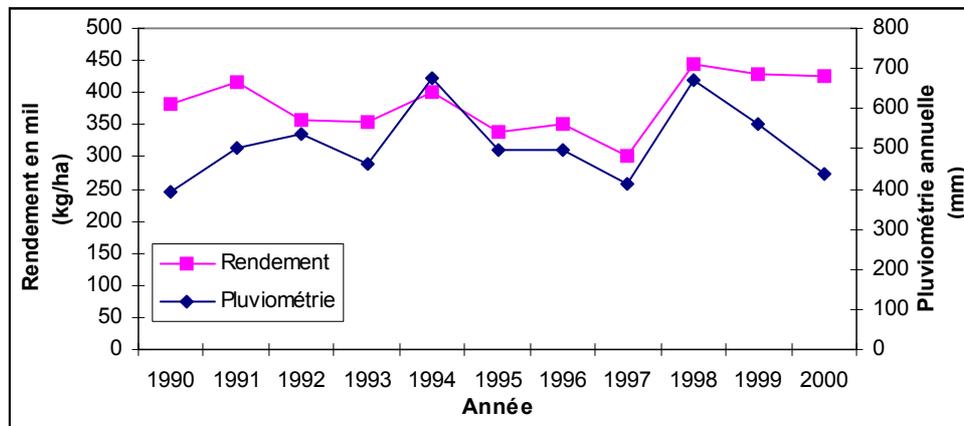


Figure 6. Evolution des rendements en mil (source : FAO, 2000) et de la pluviométrie annuelle au Niger de 1990 à 2000 (source : Ali et al., 2003)

2. Contexte local : La région du Fakara

2.1. Présentation de la zone d'étude

Le Fakara est une région couvrant approximativement 6000 km² et située à l'ouest du pays entre la vallée du fleuve Niger et la vallée du Dallol Bosso. Le canton du Fakara fait partie de l'arrondissement de Kollo situé dans la région de Tillabéri (Figure 7). Son chef-lieu administratif est le village de Dantiandou.

Le site d'étude couvre 500 km² à l'intérieur du canton (entre les latitudes 13°20' et 13°35' N et les longitudes 2°35' et 2°52' E) (Figure 8). La zone comprenait une dizaine de villages et quelques 6000 habitants en 1998.

Depuis les années 50, suite à la paix coloniale, aux progrès techniques concernant la mise en place de puits, à l'amélioration des structures médicales et à la proximité de la capitale, la densité de population n'a cessé d'augmenter dans la région.

La majorité de la production agricole est réalisée par des exploitations familiales de petite taille, pratiquement exclusivement tournées vers l'autosubsistance et dont les techniques demeurent très traditionnelles. La superficie de terre possédée par une famille (ménage) est en moyenne de 5 à 13 ha (Hiernaux et Ayantunde, 2004). La terre, et surtout le bétail, constituent la principale forme de richesse dans la région.

Le climat semi-aride montre une pluviométrie annuelle moyenne de 495 mm de 1968 à 1989 (Hiernaux et Ayantunde, 2004).

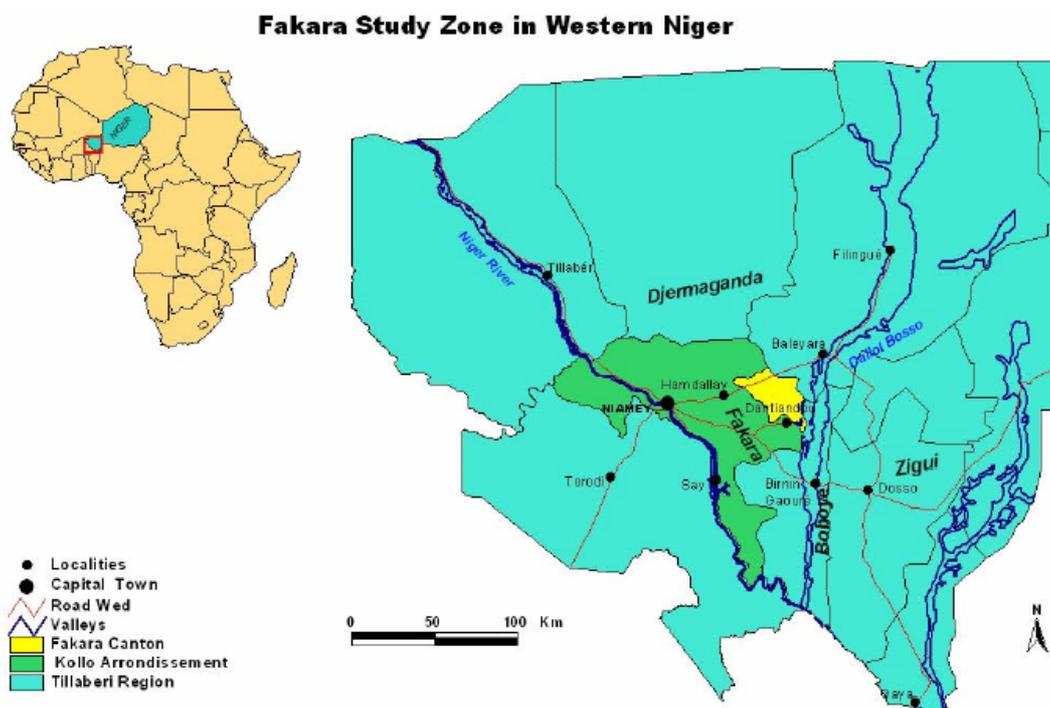


Figure 7. Localisation du canton du Fakara (source : Hiernaux et Ayantunde, 2004)

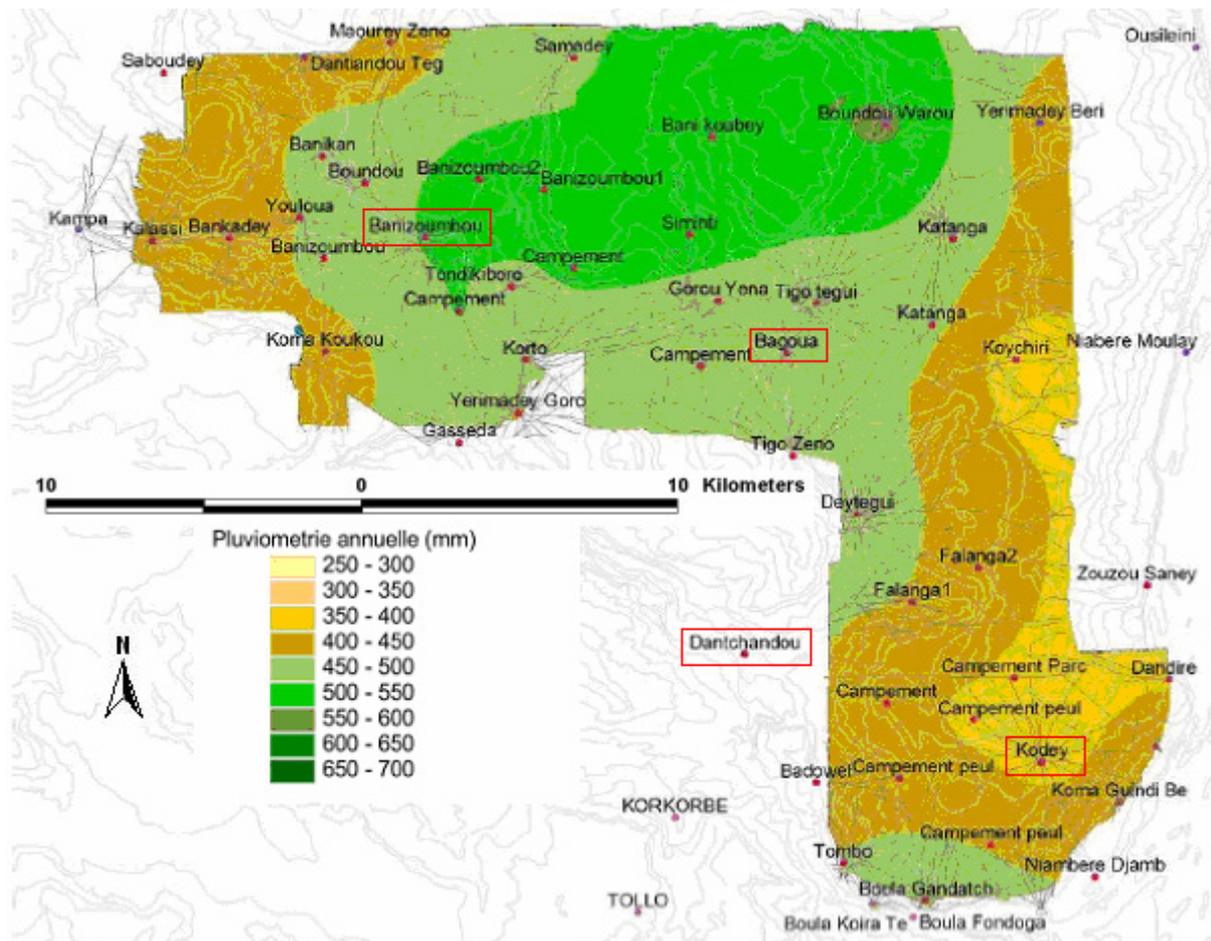


Figure 8. Délimitation de la zone d'étude et pluviométrie annuelle en 2003 (d'après ICRISAT, 2003)

2.2. Géologie, topographie et géomorphologie

Le Fakara est situé dans la partie inférieure d'un grand bassin de dépôts sédimentaires s'étendant de l'Ouest du Niger au Sud-est du Mali. La zone est dominée par une formation géologique complexe de grès plus ou moins argileux et de dépôts épais du miocène, connu sous le nom de « Continent Terminal » sur lequel repose une cuirasse latéritique de 5 à 20 m d'épaisseur. Depuis le quaternaire, l'érosion éolienne a localement contribué au dépôt de sables par dessus ces formations (Hiernaux et Ayantunde, 2004).

La zone d'étude est située sur les anciennes terrasses quaternaires de fleuves fossiles. Cinq types de relief ont été identifiés depuis les plateaux jusqu'aux bas-fonds. Les deux premiers furent creusés dans les sédiments du Continent Terminal et sont indurés par le fer dans l'horizon B tandis que les trois derniers sont dépourvus de ferrugination importante (Taupin et al., 1991, cités par Dufey, 2002) (Figure 9).

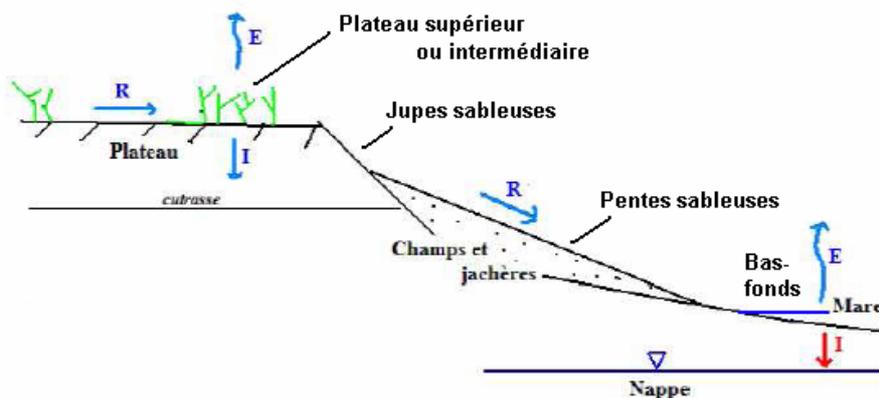


Figure 9. Coupe schématique illustrant les éléments géomorphologiques

- Les **plateaux supérieurs** s'étendent sur les formations gréseuses et présentent des sols généralement peu évolués, peu profonds, à faciès ferrugineux et à faible capacité d'infiltration (*Leptosols* selon la classification FAO). La « brousse tigrée » se forme sur ces cuirasses ferrugineuses. La faible pente des plateaux contribue à la dynamique de la végétation. Quelques ensablements locaux sont réservés à la culture mais les plateaux constituent principalement un lieu de pâturage, de prélèvement de bois de chauffe et de cueillette. Les plateaux sont les sources principales du ruissellement de l'eau sur les pentes adjacentes et les jupes sableuses ravinées.
- Les **jupes sableuses** correspondent aux bordures des plateaux. Elles présentent des pentes dont l'inclinaison est supérieure à 3 % et ne sont traditionnellement pas cultivées. Une végétation buissonnière s'y maintient et l'épaisseur de l'horizon sableux croît le long de la descente de la pente.
- Les **plateaux intermédiaires** constituent des paliers intermédiaires. En-dessous de chacun d'eux se dessinent des jupes sableuses comme ci-dessus. Le nombre de plateaux intermédiaires varie entre un et cinq selon les niveaux géologiques.
- Les **pentés sableuses** suivent les jupes sableuses. La topographie du sol y est caractérisée par une surface légèrement ondulée de petites buttes au sol acide ($\text{pH} < 5$), présentant un dénivelé de 30 à 40 cm et une largeur de 10 à 30 m. Les pentes sableuses sont creusées de ravines et de *koris* (lits de rivières temporaires). Beaucoup de sols y sont peu profonds et leurs surfaces sont compactes. En certains endroits, des horizons B indurés et enrichis en argile sont exposés (glacis). Les pentes sableuses constituent le type de relief le plus représenté et elles abritent la quasi-totalité des terres de culture avec les bas-fonds. La profondeur de sable augmente dans le bas de la pente dans les zones de cultures plus importantes.
- Les **bas-fonds** (ou fonds dépressionnaires) constituent le niveau le plus bas de la toposéquence mais ils occupent une proportion faible de la superficie totale. Il s'agit de larges vallées sableuses occupées occasionnellement par une mare ou un kori résultant du ruissellement des eaux de surface. Les bas-fonds récoltent les sédiments arrachés aux talus, glacis et jupes sableuses. Ils présentent des sols sableux à argilo-sableux, de couleur claire et à faible pente.

2.3. Pédologie et caractéristiques agronomiques des sols

Bien que les sols soient formés sur le même substrat géologique, le Fakara abrite différents types de sol (Tableau 1). A l'exception du contenu du sol en matière organique, lié aux pratiques de gestion de la fertilité, les principales propriétés chimiques et physiques des horizons de surface peuvent être mis en relation avec leur pédogenèse (elles dépendent de l'âge du dépôt sur lequel les sols sont formés, ainsi que du nombre et de la durée des périodes sèches et humides qui se sont succédées) et leur position topographique (Tableau 2) (Hiernaux et Ayantunde, 2004).

Les types de sols définis sur base de leur topographie, géomorphologie et texture en surface peuvent être groupés par niveau d'aptitude agronomique. Ils sont classés selon un gradient de fertilité chimique considérant la CEC, le pH et le contenu en matière organique et selon un gradient d'infiltration prenant en compte la profondeur, la position topographique, la texture et l'encroûtement de surface (Figure 10) (Hiernaux et Ayantunde, 2004). Ce classement empirique permet de définir 5 catégories d'aptitude agronomique des sols :

- Les sables limoneux et les limons argileux présents dans les dépressions colluviales et alluviales (*Cambic arenosols*, *Arenic cambisols* et *Arenic gleysols*) constituent le groupe de sols le plus « riche ». Ces sols offrent le potentiel le plus élevé pour la mise en culture mais ils sont susceptibles d'être inondés, à cause de leur position basse dans la toposéquence. En outre, leur texture relativement fine rend le travail du sol difficile.
- Les sols sableux épais et peu lessivés (*Ferralic arenosols* et *Arenic lxisols*) sont faciles à travailler et offrent un bon potentiel de culture pour le mil et le niébé à condition que des techniques de restauration de la matière organique soient pratiquées (jachère, apport de fumier).
- Les sols sableux épais très lessivés (*Arenic lxisols*) offrent un potentiel de culture plus faible à cause de leur faible fertilité inhérente et de leur texture très sableuse.
- Les sols sableux et sablo-limoneux minces ainsi que les sables alluviaux très lessivés (*Ferralic arenosols*, *Skeletal leptosols*, *Leptic lxisols*, *Arenic lxisol*, *Gleyic arenosols*) constituent le groupe de sols le plus marginal en terme d'aptitude à la culture. Ils sont très sensibles à l'érosion hydrique.
- Les sols indurés et les sols présentant la roche-mère apparente (*Skeletal leptosols*) ne sont pas arables.

Tableau 1. Propriétés physiques et chimiques des sols du Fakara (source : Hiernaux et Ayantunde, 2004)

	Arenic Gleysol	Gleyic Arenosol	Leptic lixisol	Arenic Cambisol	Arenic lixisol	Ferralic arenosol	Skeletal leptosol
Topography	Valley	valley	down-slope	flats	mid-slope	up-slope	plateau
Land form	river bed	alluvial deposit	erosion surface	colluvial fan	sand deposit	eroded deposit	plateau cliff
Depth (cm)	> 300	> 300	20 to 80	> 300	> 300	10 to 50	0 to 10
Color (0-20)	10YR5/6	5YR 5/8	7.5YR3/4	10YR6/4	7.5YR4/6	5YR5/6	7.5YR 5/6
<i>Texture at 0-30 cm depth</i>							
gravels (% total)	0	0	0	0 to 5	0	0 to 20	20 to 90
Sand coarse%	2-5	45-48	40-50	45-50	40-50	34-36	32-35
Sand fine%	35-40	40-45	35-40	38-42	40-50	50-53	32-38
silt %	30-35	2-3	5-8	3-5	2-3	4-7	5-8
clay %	15-25	6-12	7-12	5-10	2-5	4-8	12-17
pH (water)	5.5-6.3	5.0-5.3	5.0-5.5	4.5- 5.5	5.2-6.2	5.0-5.9	5.0-6.0
CEC (meq/100g)	5.0-7.0	1.5-2.0	2.0-2.5	1.0-2.0	0.8-1.2	1-1.6	2.0-2.5
Total N (ppm)	250-350	60-120	150-200	200-250	100-250	150-250	200-300
Total P (ppm)	2.5-5.0	1.5-2.0	1.2-2.5	1.5-2.0	1.5-3.5	0.7-1.5	2.5-5.5
K (meq/100g)	0.20-0.40	0.02-0.03	0.02-0.03	0.03-0.05	0.03-0.06	0.04-0.09	0.20-0.30
OM (%)	0.40-0.80	0.08-0.25	0.25-0.35	0.20-0.70	0.12-0.17	0.15-0.30	0.1-0.5

Sources: Desconnet, 1994; Gavaud and Boulet, 1967; Rockstöm and Valentin, 1996; Tropsoil, 1991

Tableau 2. Classification des sols par situation topographique (source : Hiernaux et Ayantunde, 2004)

Topography	Land form	Top soil texture	Soil map code	Corresponding soil type
Plateau	Dune on the plateau	Coarse sands	Pd	Ferralic arenosol
	Thin sand deposit on the iron pan	Sands	Pe	Ferralic arenosol
	Ferruginous iron pan outcrop	Rock, gravels, loamy sands	Pg	Skeletal leptosol
	Thin loamy layer on the iron pan	Loamy sands	Pl	Ferralic arenosol
	Rocky cliff of the plateau border	Rock, gravels, loamy sands	Pr	Skeletal leptosol
Up-slope	Thick sand deposits	Sands	Td	Ferralic arenosol
	Erosion surface, gullies	Loamy sands, gravels	Tr	Skeletal leptosol
	Colluvium fan	Sands, Loamy sands	Tv	Cambic arenosol
Mid and down-slope (embedded erosive surfaces = flats)	Dune on the flats	Coarse sands	Rd	Arenic lixisol
	Thin sand deposits on the flats	Sands, gravels	Re	Arenic lixisol
	Thin loamy layer on the flats	Loamy sands, gravels	Rl	Ferralic arenosol
	Erosive surfaces outcrop	Gravels, loamy sands	Rr	Leptic lixisol
	Depressions filled with colluvium	loamy sands, sands	Rv	Arenic cambisol
Valley System	Major river bed or valley banks	Sands	Vr	Arenic lixisol
	Minor river bed banks	Loamy sands	Vd	Arenic lixisol
	Fossil alluvial plain	Sands, leached	Ve	Gleyic arenosol
	Fossil levees	Loamy sands, leached	Vl	Gleyic arenosol
	Fossil canal and river beds	Loamy sands, clayed loams	Vc	Arenic gleysol
	River bed	loamy sands, clayed loams	Vv	Arenic gleysol

Les sols sur lesquels le mil est cultivé sont principalement classés en *Arenic lixisol* mais incluent également les sols de type *Arenic cambisol*, *Ferralic arenosol* et *Gleyic arenosol*.

Les sols cultivés ont une faible teneur en carbone organique et en azote total à cause de la faible production de biomasse et des taux élevés de minéralisation. Leur particularité est leur faible fertilité inhérente : faible taux de C_{org} ($< 0,3 \%$), de P total et P disponible, de N et de capacité effective d'échange cationique (ECEC). Ils sont également acides et pauvres en minéraux primaires. L'adsorption de P sur les surfaces des oxydes et hydroxydes de fer et d'aluminium s'aggrave avec l'acidification et le manque de ligands organiques, ce qui peut conduire à une réduction de la disponibilité en P pour les plantes.

L'accumulation de matière organique est fortement liée à la pluviométrie totale. La faible ECEC est liée à la faible quantité de matière organique et d'argile ainsi qu'à la minéralogie des argiles présentes (kaolinite). En surface, l'ECEC est plus liée au contenu en matière organique qu'au pourcentage d'argile (Bationo et Mokwunke, 1991 cités par Bationo et al., 2003). On comprend donc qu'une diminution du contenu en matière organique provoque une baisse de l'ECEC et donc de la capacité de retenir les nutriments. D'après Van Keulen (1990) (cité par Bationo et al., 2003), une différence de $0,1 \%$ en C_{org} provoque une différence de $4,3 \text{ cmol}_+ \text{ kg}^{-1}$ en ECEC.

Les sols cultivés du Fakara sont très sableux et présentent des conductivités hydrauliques élevées ainsi qu'un drainage interne rapide. Cela signifie qu'en cas d'année pluvieuse ou d'événements pluvieux intenses, des pertes d'éléments nutritifs par lessivage ont lieu. D'autre part, même si leur perméabilité est importante, ces sols peuvent également souffrir de pertes en eau et en éléments nutritifs à cause du ruissellement et de l'encroûtement (diminuant l'eau disponible pour les plantes et causant de l'érosion). L'érosion éolienne, l'encroûtement de la couche superficielle du sol et l'érosion hydrique sont les processus de dégradation physique du sol les plus importants (Bationo et al., 2000).

La conductivité thermique des sols varie avec leur teneur en eau, leur densité apparente, leur teneur en matière organique et leur composition minérale. D'après van Wambeke (1995), les sols secs ne contenant que peu de matière organique sont les plus sensibles aux extrêmes de températures. Dans les couches superficielles sableuses, la température peut dépasser les niveaux critiques pour la levée des semis et la croissance des racines (la température peut atteindre 55°C dans le premier cm de sol).

FAKARA SOILS MAP

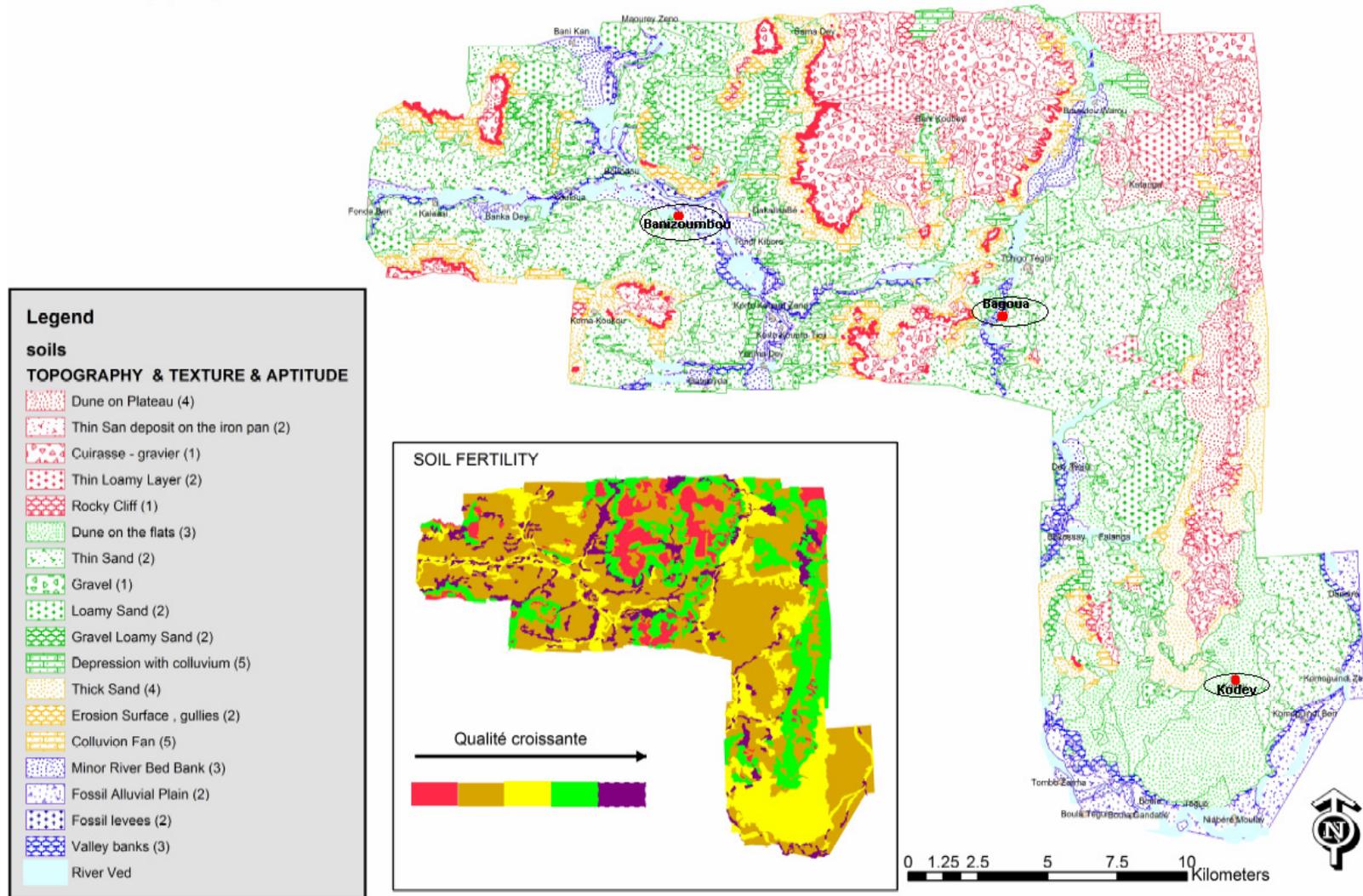


Figure 10. Carte des unités topographiques, géomorphologiques et texturales des sols du Fakara et carte dérivée de l'aptitude potentielle à la mise en culture (gradient de fertilité) (source : Hiernaux et Ayantunde, 2004)

2.4. Agriculture

a) Le système de culture : agriculture sédentaire (Zerma) et élevage (Peul)

Le système de culture est caractérisé par la cohabitation de deux groupes ethniques : les Zermas (Djerma, Jerma, Zarma, Zarma-Songhay) sont des cultivateurs sédentaires et les Peuls (Peulh, Fulani, Fulfulde) sont des éleveurs autrefois nomades (Figure 11). Les deux populations ont co-évolué pour former le système agro-pastoral à dominance sédentaire actuel.

Les jeunes hommes de la région partent « en exode » dans les pays frontaliers après la récolte. Les revenus de la récolte permettent de payer leur voyage et d'effectuer un travail généralement commerçant ou artisan. Ils reviennent au pays aider leur famille lors de la « période de soudure » qui désigne la fin de la saison sèche et le moment où les greniers des ménages commencent à manquer de grain. Le mil est à cette période à son cours le plus haut.



Figure 11. Femmes Peul dans un champ de mil à Kodey

b) Les cultures principales

L'agriculture est principalement tournée vers la subsistance. Elle est basée sur le mil et le sorgho associés à des cultures secondaires telles que les légumineuses (niébé, noix de Bambara, arachide) et des cultures de rente (sésame, oseille). Dans ce contexte, le développement du marché de Dantiandou a pu favoriser le développement des productions cultivées par les femmes dans les jardins de case.

c) Le mil

Le mil pénicillaire (*Pennisetum glaucum* (L.) R. Br., *P. typhoides*, *P. typhideum*, *P. americanum*) est une culture répandue au Sahel. Le mil est généralement mieux adapté que la plupart des autres cultures aux régions sèches et aux sols sableux et pauvres. Cette céréale a la particularité de pouvoir être cultivée dans des conditions extrêmes : températures élevées, précipitations faibles et irrégulières, période végétative brève, sols acides, très peu fertiles et ayant une faible capacité de rétention en eau. Le mil a un système racinaire robuste et

profond, ainsi qu'un court cycle de croissance, sa croissance est donc rapide lorsque l'eau est disponible (FAO et ICRISAT, 1997). Sa culture est généralement pratiquée sans irrigation ni apport d'engrais chimiques.

Le mil représente environ 75 % de la consommation totale de céréales au Niger. Il est cuisiné en bouillies et en galettes. La teneur en protéines des grains est comparable à celle du blé, de l'orge et du maïs (FAO et ICRISAT, 1997).

➤ *Structure morphologique du mil*
(Maiti et Bidinger, 1981)

La plante possède un port érigé et sa hauteur varie entre 0,5 et 4 mètres selon les variétés. L'appareil racinaire est de type fasciculé (une racine séminale et de nombreuses racines adventives). Le développement racinaire important, pouvant atteindre jusqu'à 180 cm à la récolte, permet une bonne adaptation aux conditions pédo-climatiques de la zone semi-aride. La tige est rigide et les entre-nœuds sont pleins. Les entre-nœuds de la base s'allongent les derniers et sont les plus courts. Les nœuds de la base sont capables de donner des talles secondaires et tertiaires. Les talles ne sont pas tous fertiles : 1 à 7 talles par plante parviennent généralement à produire. Les feuilles alternes et à nervures parallèles s'insèrent sur la tige et les talles au niveau des nœuds. Elles possèdent une gaine enserrant la tige et un limbe lancéolé. Les nervures sont bien développées et empêchent le limbe de se plier. Le limbe porte des stomates sur ses deux faces.

L'inflorescence est constituée d'une panicule apicale très dense et de forme cylindrique. Sa longueur et son diamètre varient en fonction de la variété (15 à 140 cm pour la longueur et de 0,5 cm à 4 cm pour le diamètre). La panicule (faux épi) est formée d'un rachis rigide portant les épillets pédonculés et groupés en bouquets. Chaque épillet comprend deux fleurs : la fleur supérieure est hermaphrodite ou femelle, généralement fertile, tandis que la fleur inférieure est stérile ou mâle. En général, quelques jours de décalage entre les floraisons mâles et femelles assurent la fécondation croisée.

Le fruit est un caryopse long d'environ 4 mm et de couleur variable.

➤ *Croissance et développement du mil*
(Maiti et Bidinger, 1981)

Le cycle de croissance du mil peut être divisé en trois phases : la phase végétative, la phase reproductive et la phase de remplissage des grains.

La phase végétative (de 0 à 50 JAS)

La phase végétative débute lors de l'émergence de la plante et se poursuit jusqu'à l'initiation de la panicule. La germination du mil est hypogée et si les conditions sont favorables, se produit environ 24 heures après le semis. La levée a lieu avec l'apparition de la première feuille, 4 à 5 jours après le semis (JAS). A la fin de la levée, les bourgeons de toutes les feuilles sont apparus et chez les variétés précoces, 6 à 7 feuilles sont déjà développées. La

plantule développe son système racinaire primaire et forme de nombreuses racines adventives. Le tallage débute 15 jours après la levée et se poursuit durant 10 à 20 jours. Les talles produits tardivement ne formeront pas d'épis ou leurs épis ne parviendront pas à maturité. La taille de la plante reste réduite car l'allongement des entre-nœuds ne s'est pas encore produit. Durant la phase végétative, l'accumulation de biomasse concerne essentiellement les feuilles et les racines. L'initiation de la panicule est marquée par l'élongation du dôme apical et permet l'entrée dans la phase suivante.

La phase reproductrice (de 50 à 75 JAS)

Les feuilles s'étendent et les premières feuilles, à la base de la plante, se dessèchent. Lors de la montaison, les entre-nœuds se rallongent en partant de la base. Les talles suivent les mêmes phases que la tige principale avec un décalage dans le temps. Dans cette phase, l'accumulation de la biomasse concerne la tige en plus des racines et des feuilles. La panicule développe des épillets, des fleurs, des stigmates, des anthères et émerge. Deux ou trois jours plus tard a lieu la floraison. Les fleurs femelles s'épanouissent les premières, commençant par le sommet de la panicule et en descendant progressivement, suivies par les fleurs mâles. Cinq à six jours plus tard, la floraison et la fécondation de la panicule sont terminées.

La phase de remplissage des grains (> 75 JAS)

Cette phase commence lors de la fécondation des fleurs de l'inflorescence principale et se poursuit jusqu'à la maturité de toute la plante (tige principale et talles). L'accumulation de biomasse se produit surtout dans les caryopses mais continue également dans les autres parties car les talles accusent un retard de développement. La sénescence des feuilles se poursuit jusqu'à ce qu'il n'y ait plus que les 2 ou 3 dernières feuilles encore vertes. Les grains traversent une phase laiteuse, une phase cireuse et une phase vitreuse avant de parvenir à la maturité physiologique, environ 20 à 50 jours après la floraison selon les variétés.

➤ *Principales contraintes biotiques à la culture de mil*

Le **mildiou** ou lèpre du mil est sans doute la maladie la plus dangereuse du mil dans le Sahel (Mbaye, 1993). Le mil est la principale plante-hôte du champignon (*Sclerospora graminicola* (Sacc.) Schroet) responsable du mildiou. Avant l'épiaison, les plantes malades présentent d'abord une décoloration jaunâtre de leur feuillage pouvant apparaître très tôt sur les jeunes plantes. En cas d'infection précoce ou sévère, les plantes se rabougrissent ou meurent. A l'épiaison, les fleurs attaquées se transforment, en partie ou entièrement, en feuilles avec production d'épis difformes, appelés parfois « balais de sorcières ». Les épis atteints deviennent noirs et boursoufflés.

Le **shibra** (*Pennisetum stenostachyum*) est la forme adventice du mil. Elle provient d'un croisement entre mil cultivé et mil sauvage. Par un mécanisme de mimétisme, cette forme adventice parvient à échapper au sarclage. Les plants de shibra sont facilement identifiables au champ à la récolte, ils donnent des épis de mauvaise qualité (Niangado, 1989).

Le *Striga hermonthica* (L.) est une plante adventice à fleurs mauves, parasite obligatoire qui vit aux dépens du mil (Figure 12). Cette espèce est présente dans toutes les zones de production de mil au Niger et cause des dégâts appréciables à la culture (Mbaye, 1993). Les graines de *S. hermonthica* émettent une racicule très ténue qui doit se fixer rapidement sur une racine hôte (moins de 96h) sous peine de dégénérer. Après la fixation, la plantule de *S. hermonthica* met en place un suçoir conique qui pénètre dans les tissus de la racine hôte.



Figure 12. *S. hermonthica* parasite le mil.

Différents **insectes** deviennent nuisibles pour la culture de mil s'ils sont présents en grand nombre. Les chenilles mineuses d'épi (particulièrement *Heliocheilus albipunctella*), les insectes foreurs de tiges, différents diptères et coléoptères ravageurs et les criquets pèlerins (*Schistocerca gregaria*) peuvent provoquer des dégâts considérables (Mbaye, 1993). Les punaises se développent sur les épis en cas de sécheresse. D'autre part, les plants de mil situés sur des fourmilières se développent moins bien car leur système racinaire est attaqué.

Les **oiseaux granivores** peuvent occasionner des pertes en grains sévères, surtout si la récolte est retardée par rapport à la maturité des grains.

d) L'agriculture traditionnelle

➤ Jachère et travaux préparatoires

De faibles niveaux d'intrants et la faible fertilité des sols limitent les rendements et expliquent les périodes de jachère (15 à 20 ans) traditionnellement pratiquées pour restaurer la fertilité. Après la période de jachère, la préparation du champ nécessite de couper ou brûler les arbustes présents. Suite à la pression sur les terres, les périodes de jachère tendent à raccourcir ou à disparaître au profit d'une culture permanente.

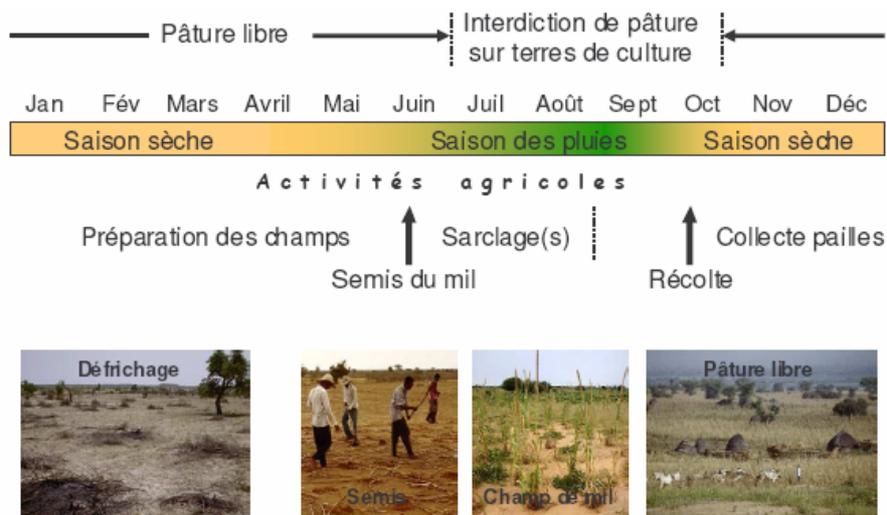


Figure 13. Représentation schématique du calendrier des pratiques agro-pastorales (source : Bielders et al., 2004)

➤ *Semis*

Le mil est semé au cours des trois premiers jours suivant la première pluie importante (> 15-20 mm en deux jours), entre le 15 mai et la fin du mois de juin. Si la première pluie n'est pas suivie d'une seconde pluie rapidement (10 à 15 jours), la germination peut avorter et les paysans se voient régulièrement contraints de ressemer. Le mil est semé en poquets, dans des petits creux formés à l'aide d'une houe traditionnelle et espacés de 1 à 1,5 m. Les paysans y placent une pincée de semences (de 15 à 40 graines) et le rebouchent immédiatement.

La densité de semis est traditionnellement faible : 5000 poquets ha⁻¹ afin de favoriser le tallage (de Rouw, 2003). Les densités de semis sont plus élevées à proximité des villages car le recyclage de matières organiques conduit à une fertilité des sols plus importante (Figure 14).

Pendant la période culturale, les animaux sont éloignés du champ. Ils sont soit mis en enclos, soit envoyés en transhumance vers le nord (Figure 13).



Figure 14. Auréole de fertilité autour d'un village (source : Gérard-Delfosse)

➤ *Sarclage et démariage*

Le sarclage est le seul travail du sol effectué. Réalisé uniquement par les hommes, il requiert une main d'œuvre importante : la superficie moyenne sarclée par jour par adulte est de 0,15 ha. Effectué à l'aide de la hilaire (lame courbe fixée au bout d'un manche en bois), il permet la coupe des mauvaises herbes et la déstructuration des croûtes superficielles.

Les fermiers considèrent que le sarclage est indispensable pour sécuriser un minimum la production de mil. Les champs sont en général sarclés deux fois au cours de la saison de croissance (environ la 2^{ème} et la 6^{ème} semaine après le semis). Lorsque cela n'est pas effectué, c'est souvent à cause du manque de main d'œuvre causé par des contraintes économiques ou sociales (Hayashi et al., 2005).

Le démariage consiste à déraciner les plants excédentaires au niveau d'un poquet pour limiter la compétition. Il est également réalisé à l'aide de la hilaire et dans le courant du mois du semis. Le démariage à 3 plants par poquet semble le plus courant.

➤ *Récolte*

Lorsque les plants sont parvenus à maturité, en fin de saison des pluies (Figure 13), les épis sont récoltés à l'aide d'un couteau et assemblés en bottes de 200 à 300 épis. Les bottes sont ensuite séchées et transportées, à pied ou en charrette jusqu'aux greniers (Figure 15). Le mil peut être stocké pendant plusieurs années mais il est généralement consommé dans l'année ou vendu après la récolte. Le péricarpe dur des grains protège en effet l'endosperme de l'attaque des insectes et les grains sont récoltés et stockés dans des conditions sèches (FAO et ICRISAT, 1997).

Les pailles peuvent être récoltées notamment pour leur utilisation dans la construction de clôtures (Figure 15). Les résidus de culture peuvent également être laissés au champ où ils constituent une source importante de fourrage et contribuent à enrichir et protéger le sol.



Figure 15. Clôtures en paille de mil et greniers à grain à Tigo Tégui

e) Un système en déséquilibre : agriculture minière et insécurité alimentaire

La dépendance de l'agriculture et de l'élevage face aux aléas environnementaux rend les populations rurales nigériennes particulièrement vulnérables en terme de sécurité alimentaire. L'accroissement rapide de la population observé ces dernières décennies a conduit à l'augmentation des surfaces cultivées, à l'expansion de l'agriculture vers des terres marginales et au renforcement de la pression sur les terres par les processus de surpâturage et déforestation. Les effets des changements dans l'occupation du territoire sur l'érosion sont aggravés par le fait que la plupart des sols sahéliens sont de nature sableuse et offrant peu de résistance à la désagrégation par le vent ou l'eau (Bationo et al., 2000). En général, la faible couverture du sol par les plantes encourage les effets néfastes de l'érosion éolienne et hydrique sur la productivité de la couche supérieure du sol.

Les sols sont peu altérés et présentent une faible fertilité inhérente. La culture permanente pratiquée sans restauration de la fertilité du sol provoque une diminution en éléments nutritifs et en matière organique ainsi qu'une acidification de la plupart de ces sols. Les bilans en éléments nutritifs deviennent de plus en plus négatifs et l'agriculture devient alors de plus en plus minière.

La pauvreté, la dégradation de l'environnement et la faible productivité agricole sont entrelacés et menacent toujours plus la sécurité alimentaire. Pour améliorer cette situation, la croissance agricole doit passer par une augmentation de la productivité des sols plutôt que par l'extension spatiale de la superficie cultivée et la mise en culture de terres toujours plus marginales.

La fertilité des sols sous culture peut seulement être maintenue par une gestion intégrée des éléments nutritifs pour les plantes. Cette gestion implique un recyclage efficient des matériaux organiques comme les résidus de culture ou le fumier, en combinaison avec des engrais minéraux et en utilisant la rotation ou l'association avec des légumineuses (Bationo et al., 1998).

Les contraintes à la production des systèmes de cultures à base de mil sont donc multiples : contraintes abiotiques (édaphiques et climatiques), contraintes biotiques (maladies, insectes, adventices) et contraintes socio-économiques (démographie, pauvreté, insécurité alimentaire, ...). Nous abordons ici principalement le premier type de contrainte.

2^{ème} partie : Pratiques de gestion de la fertilité

L'augmentation de la productivité des sols et des rendements du mil est limitée par les ressources en eau et en nutriments du sol. Les niveaux faibles de P et N du sol sont les contraintes principales à la croissance des cultures.

Les bilans en éléments nutritifs du sol peuvent être quantifiés en mesurant les variations de matière organique et d'éléments minéraux dans le sol en l'absence de fertilisation ou en soustrayant les outputs en nutriments aux inputs apportés au sol. En Afrique de l'Ouest, ces bilans sont généralement négatifs à cause de la maigre fertilité naturelle de ces sols et à cause du faible niveau de fertilisation pour remplacer les nutriments enlevés du système du sol (Bationo et al., 1998). Les éléments nutritifs sont soustraits par l'exportation de pailles et de grains de mil mais également par l'érosion éolienne et hydrique ainsi que par lessivage. Buerkert et Hiernaux (1998) (cités par Gandah et al., 2003) estiment à 15 kg N, 2 kg P et 15 kg K ha⁻¹ la perte en nutriments pour un rendement de 440 kg de grain et 1860 kg de paille. D'autre part, à faible densité de semis (3000 à 5000 poquets ha⁻¹), d'autres chiffres sont avancés par Buerkert (unpublished data, cité par Esse et al., 2001) qui évalue les **besoins du mil** par hectare à 21-28 kg N, 1,7-2,3 kg P et 35-37 kg K pour un rendement de 300-500 kg grain et 1700-2300 kg paille.

Certaines pratiques de gestion de la fertilité traditionnellement utilisées par les paysans sahéliens ainsi que des technologies nouvelles ayant fait l'objet de nombreuses études sont disponibles pour combattre la perte en nutriments du sol. Il faut différencier les pratiques qui empêchent les nutriments d'être perdus des agro-écosystèmes (telles que le contrôle de l'érosion, la restitution de résidus de culture, l'agro-foresterie et le recyclage de déchets ménagers et de fumier) des technologies qui ajoutent des nutriments au système (comme l'application de fertilisants inorganiques et d'amendements, les inputs organiques de l'extérieur de la ferme et la fixation d'azote atmosphérique) (Bationo et al., 1998).

Différentes pratiques de gestion de la fertilité dans le cadre de la culture du mil en milieu sahélien sont discutées ci-dessous. D'autre part, les stress hydriques ont un impact sur la croissance et le développement du mil. Les rendements en mil sont modulés par la contrainte hydrique et nous discuterons brièvement dans la partie 7 des mécanismes intrinsèques de résistance à la sécheresse du mil.

1. Amendements inorganiques

De nombreuses études démontrent que l'utilisation judicieuse d'engrais minéraux conduit à une augmentation des rendements (Buerkert et al., 2001 ; Bationo et al., 1998 ; ...) à condition qu'aucun autre facteur de croissance (tels que l'eau et le rayonnement) ne devienne restrictif. L'utilisation d'engrais ne permet pas seulement d'augmenter la biomasse aérienne et de rendre disponible plus de résidus de culture mais elle est potentiellement susceptible

d'augmenter la biomasse racinaire, permettant un accroissement de matière organique dans le sol (Bationo et al., 2001).

Les fertilisants inorganiques combinent généralement trois éléments :

- **l'azote** est un élément constituant de nombreuses molécules organiques d'importance, allant des protéines aux acides nucléiques ;
- **le phosphore** joue un rôle prédominant dans le transfert énergétique et le métabolisme protéique ;
- **le potassium** est important pour la régulation ionique et osmotique. Il agit également comme cofacteur ou activateur pour de nombreuses enzymes du métabolisme glucidique et protéique (Van Duivenbooden, 1996).

Les engrais possèdent un intérêt logistique avantageux comparés aux apports organiques : ils sont des formes concentrées de nutriments et peuvent être transportés facilement. Ils ont aussi leur désavantage : les engrais chimiques seuls ne peuvent pas soutenir les rendements à long terme. Dans les sols sableux, l'utilisation d'engrais inorganiques peut causer une **acidification** du sol à cause du faible pouvoir tampon du sol. Ce problème diminue si les quantités sont faibles (45 kg N, 20 kg P et 25 K kg ha⁻¹) et que l'augmentation des rendements permet une augmentation de la matière organique du sol (Shapiro et Sanders, 1998). Quand des engrais minéraux sont combinés avec des amendements organiques, le risque d'acidification du sol est amoindri et on peut obtenir des systèmes de production productifs et durables (Bationo et al., 2000 ; Harris, 2002).

D'autre part, force est de constater que l'Afrique sub-Saharienne possède le plus faible taux de consommation en engrais au monde (environ 8 kg nutriments ha⁻¹an⁻¹ d'après Bationo et al., 1998). L'application d'engrais minéraux concerne moins de 5 kg ha⁻¹an⁻¹ dans la zone soudano-sahélienne (Buerkert et al., 2001) et seulement 0,8 kg ha⁻¹an⁻¹ au Niger (Sivakumar et Salaam, 1999). Les engrais importés sont chers et difficiles d'accès dans les campagnes. En outre, leur achat doit s'effectuer à la période de l'année où la plupart des paysans souffrent de problèmes de revenus (période de soudure).

Dans ce contexte, la technique d'application localisée d'engrais au poquet (micro-doses de 3 à 5 kg P ha⁻¹) est particulièrement prometteuse au niveau de l'efficacité de l'utilisation de l'engrais par la plante et au niveau de la diminution des coûts d'investissement par les agriculteurs. Elle permet un apport direct des nutriments à la zone racinaire, stimulant la croissance précoce des racines, la croissance et la floraison, et favorisant un prélèvement plus important des nutriments initialement présents dans le sol (Buerkert, 1995).

Le Tableau 3 dresse une liste des principaux engrais, leurs acronymes et leurs pourcentages en éléments nutritifs. Tout au long de ce rapport, N, P et K sont exprimés sous forme élémentaire; les conversions appliquées sont : $P = P_2O_5/2,29$ et $K = K_2O/1,20$ (Van Duivenbooden, 1996).

Tableau 3. Principaux engrais (source : IFA et FAO, 2001)

	N Azote	P ₂ O ₅ Acide phosphorique	K ₂ O Potasse	S Soufre
----- Pourcentage d'éléments nutritifs -----				
ENGRAIS AZOTES				
Sulfate d'ammoniaque (SA)	21	0	0	24
Nitrate d'ammonium (AN)	33.5	0	0	0
Ammonitrate calcaire (CAN/NAC)	26	0	0	0
Urée	46	0	0	0
ENGRAIS PHOSPHATES				
Superphosphate simple (SSP)	0	15-20	0	12
Superphosphate triple (TSP)	0	46	0	0
Phosphate diammonique (DAP)	18	46	0	0
ENGRAIS POTASSIQUES				
Chlorure de potassium (MOP)	0	0	60	0
Sulfate de potassium (SOP)	0	0	50	18

1.1. Phosphore

a) **Déficience en P et effet des engrais phosphatés**

Dans les sols sableux sahéliens, les quantités de P total et de P disponible (P_{Bray}) sont très faibles, pouvant atteindre moins de 40 mg P total kg^{-1} et 2 mg P_{Bray} kg^{-1} (Bationo et al., 2003). Ces faibles valeurs peuvent être expliquées par les facteurs suivants :

- Le matériau parental composé de sables éoliens à faibles réserves minérales ;
- la proportion élevée du P total sous forme indisponible à la culture ($P_{\text{Bray}}/P \text{ total} = 0,06$ d'après Bationo et al. (2003) dans les sols d'Afrique de l'Ouest semi-aride) ;
- le faible taux de matière organique et la récolte d'une partie des résidus de culture du champ.

La **matière organique** possède un double effet bénéfique sur la dynamique de P dans le sol : P peut être relâché lors de sa minéralisation et elle fournit des ligands organiques qui complexent les surfaces des oxydes et hydroxydes de fer et d'aluminium, diminuant l'adsorption du P. La croissance du mil sur les sols sableux acides de l'Ouest du Niger n'est pas restreinte par la toxicité aluminique (Kretzschmar et al., 1991). Mais l'**acidification** promeut l'adsorption de P par les oxy-hydroxydes, ce qui peut conduire à une réduction de la disponibilité en P pour le mil (Bationo et al., 1990, cité par Biielders et al., 2002).

Huit mg P_{Bray} kg^{-1} a été déterminé comme étant le niveau critique nécessaire pour une croissance optimale du mil. Ce niveau ne peut être atteint que par une application répétée d'engrais. Etant donné que les grains de mil sont petits (10 mg), ils contiennent une réserve en P très faible (20 μg grain⁻¹) et les plantules dépendent fortement d'un apport externe en P après l'émergence (Muehlig-Versen et al., 2003). Si l'eau n'est pas un facteur limitant, la réponse à la fertilisation phosphatée est substantielle. Bationo et al. (2003) démontrent que **P est l'élément le plus limitant** dans la production de mil. Il n'y a pas de réponse aux

fertilisants azotés sans correction préalable de la déficience phosphatée (Buerkert et al., 2002). L'addition de 30 kg P₂O₅ ha⁻¹ permet d'augmenter les rendements en grain de 190 kg ha⁻¹ à 714 kg ha⁻¹, l'addition supplémentaire de 120 kg N ha⁻¹ permettant d'atteindre 1173 kg ha⁻¹ (Bationo et al., 2003).

La distribution possible de l'engrais phosphaté se répartit en quatre fractions (Van Duivenbooden, 1996) :

- fixé sur la fraction minérale du sol (sur les particules argileuses et les oxy-hydroxydes de fer) ;
- intégré à la matière organique du sol ;
- résiduel (P disponible au cours de l'année suivant l'application) ;
- absorbé par la plante (en moyenne : 10 - 16 %).

L'effet bénéfique des engrais est de façon générale attribué à une croissance initiale des feuilles plus rapide, ce qui permet une interception des radiations plus efficace, un développement racinaire rapide et une augmentation de l'eau extraite par transpiration. De faibles apports en fertilisant phosphaté permettent donc d'augmenter assez rapidement les quantités de phosphate soluble et d'obtenir une réponse de la plante. Muehlig-Versen et al. (2003) notent que l'apport de P permet d'augmenter le nombre de panicules par poquet et favorise le remplissage précoce des grains par rapport à des plants « témoins » non fertilisés.

Subbarao et al. (2000) montrent que l'application l'épandage de P à la volée (13 kg P ha⁻¹) pendant onze années consécutives permet d'augmenter le P_{Bray} du sol de 6,6 à 18,22 mg kg⁻¹, tandis que le P_{Bray} du sol diminue de 6,6 à 2,6 mg kg⁻¹ sous culture de mil sans application d'engrais. Utilisant le même taux d'application, Yamoah et al. (2002) notent également une augmentation significative du contenu en P du sol au cours d'un essai sur 9 ans, ce qui signifie que la fertilisation phosphatée est susceptible de fournir un effet résiduel après l'année d'application.

b) L'application localisée de P en micro-doses

Diverses études menées en milieu paysan révèlent le placement de P au poquet comme une stratégie attrayante pour surmonter la déficience en P.

Davis et al. (1994) (cités par Buerkert, 1995) ont rapporté une augmentation de 30 % du rendement en grain avec 22,5 kg P ha⁻¹ et de 80 % avec 45 kg P ha⁻¹ placés par poquet en comparaison avec une application à la volée.

Bationo et Buerkert (2001) notent qu'au taux d'application de 4 kg P ha⁻¹ (sous forme de NPK 15-15-15), cette technique permet également de doubler l'efficacité d'utilisation de P par le mil et de diminuer de 70 % le coût d'investissement supporté par l'agriculteur comparée à l'application à la volée de 13 kg P ha⁻¹ (sous forme de SSP).

Muehlig-Versen et al. (1997) notent que l'application localisée de P (5 kg P ha⁻¹), augmente davantage le poids en matière sèche des plantules au moment du démarrage et permet d'atteindre des rendements valant 60 à 70 % de ceux obtenus avec l'épandage de P à la volée (13 kg P ha⁻¹). Cette augmentation a lieu même si, à de faibles teneurs en eau du sol, le placement de SSP (superphosphate simple) à proximité de la semence réduit le taux

d'émergence des plantules. Muehlig-Versen et al. (2003) recommandent l'utilisation de NPK (15-15-15) en grains fins plutôt que le SSP pour limiter ce risque de brûlage chimique des plantules. En outre, l'application localisée de P permet d'améliorer le prélèvement de K et de N (qui augmente de 2 à 3 fois) par la plantule, indiquant que N ne limite pas la croissance initiale du mil (Muehlig-Versen et al., 2003). L'application en micro-doses au poquet a des avantages supplémentaires par rapport à une application à la volée dans les régions affectées par l'érosion éolienne (où les risques d'ensevelissement des plantules sont plus élevés) et les années de démarrage tardif ou de fin précoce de la saison des pluies (où l'implantation rapide des plantules est souhaitable).

Buerkert (1995) a montré par ailleurs que l'application de $0,5 \text{ kg P ha}^{-1}$ sous forme de super phosphate simple (SSP) n'augmentait pas les rendements finaux mais permettait de favoriser le développement initial des plantules.

L'application localisée de **3 à 5 kg P ha⁻¹** sous forme de SSP est recommandée (Muehlig-Versen et al., 1997). Le problème est que ces quantités sont hors d'atteinte pour la plupart des fermiers qui font de l'agriculture de subsistance. Toutefois, Buerkert et al. (2001) montrent que le risque économique (au niveau du retour sur l'investissement) d'appliquer P en micro-doses est inférieur à celui de ne pas appliquer de P, excepté lorsque les niveaux de productivité sont très faibles. Plus le sol est productif, plus cette technologie est efficace. Les auteurs rapportent des augmentations de 50 à 220 % de la matière sèche totale suite à l'application de 4 kg P ha^{-1} au poquet, c'est-à-dire de $0,4 \text{ g P}$ par poquet à une densité de semis de $10\,000$ poquets ha^{-1} .

Buerkert et al. (2001) montrent qu'à un même taux d'application (4 kg P ha^{-1}), les augmentations de rendements sont similaires avec DAP (phosphate diammonique 18-46-0) et NPK (15-15-15). A ce taux d'application, NPK contient $9,2 \text{ kg N ha}^{-1}$ dont la moitié sous forme de NH_4 tandis que DAP contient $3,6 \text{ kg N ha}^{-1}$ entièrement sous forme de NH_4 . Cela indique que le composé NH_4 de NPK peut avoir augmenté les effets de P sur les plantules en stimulant directement la croissance racinaire. Le DAP requiert une application en quantité moindre (2 g par poquet) que le NPK (6 g par poquet) pour des performances équivalentes et les prix à l'unité de P appliqué sont plus avantageux.

Le placement de P au poquet à de faibles taux d'application est potentiellement utilisable par les agriculteurs sahéliens si l'accès aux engrais est amélioré mais il faut nuancer : cette pratique ne permettra pas de restaurer les réserves en P du sol (Muehlig-Versen et al., 2003).

c) L'application de phosphates naturels

Au Niger, on trouve le phosphate à l'état de minerai à Tahoua et au Parc-W. Ce fertilisant naturel de bonne qualité est disponible localement et pourrait constituer une bonne alternative aux fertilisants importés. D'après Mahame et al. (1997) et Buerkert et al. (2001), il ne sera utilisé comme alternative au SSP que si le coût est très inférieur pour l'agriculteur et son application sera restreinte à des zones de pH bas ($\text{pH-KCl} < 4,2$) et de pluviométrie annuelle élevée ($> 600 \text{ mm}$). Sous ces conditions, Buerkert et al. (1997) ont montré que

l'application de phosphates naturels de Tahoua permettait d'augmenter les rendements de 76 % comparée à l'application de SSP. Pour Shapiro et Sanders (1997), les phosphates naturels ne seront compétitifs par rapport aux engrais importés que lorsque leur prix vaudra environ 25 % de ceux-ci.

Buerkert et al. (2001) rapportent que la combinaison de phosphates naturels et de P en micro-doses montrent des effets additifs importants et plus ou moins indépendants de N. Le minerai affecte surtout le statut à long-terme de P dans le sol tandis qu'une petite quantité de P disponible directement stimule la croissance de la plantule et augmente le prélèvement total de P grâce à un meilleur développement racinaire (complémentarité des deux formes d'application de P).

L'enrobage des semences est une autre technique, mais elle requiert des facilités industrielles que le Niger ne possède pas encore (Buerkert, 1995 ; Muehlig-Versen et al., 2003).

1.2. Azote

a) **Carences en N et devenir des fertilisants azotés**

L'azote présent dans le sol provient des dépôts atmosphériques, de la fixation biologique, de sources organiques et de la fertilisation. Environ 98 % de l'azote du sol est stabilisé dans la matière organique (Bationo et al., 2003). La quantité de N disponible pour les plantes est corrélée avec la teneur en matière organique du sol.

Si les pertes par érosion du sol ne sont pas prises en compte, l'engrais azoté appliqué au sol peut être réparti en cinq fractions (Van Duivenbooden, 1996) :

- intégré à la matière organique du sol ;
- lessivé ;
- perdu par dénitrification ;
- volatilisé ;
- absorbé par les cultures.

Contrairement aux engrais phosphatés, les engrais azotés ne montrent pas d'effet résiduel important après la première année d'application. Cela s'explique par leur forte solubilité et les pertes par lessivage associées ainsi que par les pertes par volatilisation. Les pertes par lessivage sont dépendantes de la pluviosité annuelle (intensité et distribution) et de la fertilisation phosphatée : si la croissance de la culture est limitée par P, l'eau et l'engrais azoté sont sous-utilisés et le lessivage sera important. Les pertes par volatilisation sont les plus importantes, elles dépendent de la forme sous laquelle N est appliqué. Les pertes par dénitrification sont en général négligeables (Hafner et al., 1993).

Le coefficient d'utilisation apparente de l'engrais azoté (exprimé en kg de N absorbé par kg de N appliqué) varie considérablement, dépendant entre autres des précipitations, de la disponibilité en P, du type de culture, de la densité de semis, du type d'engrais et des mode et période d'application (Van Duivenbooden, 1996 ; Bationo et Vlek, 1997).

b) Doses et formes d'application de N

Christianson et Vlek (1991) (cités par Bationo et al., 2003) ont calculé que le taux de fertilisation azotée optimum au niveau agronomique était de **30 kg N ha⁻¹** pour la culture de mil. Ce taux est proche de celui cité par Buerkert (28 kg N ha⁻¹) et permet de produire 9 kg de grain par kg d'azote utilisé (contre 18 kg de grain par kg d'azote d'après Buerkert, travaillant sans doute avec une densité plus faible). Au delà de ce taux, l'augmentation des rendements par unité de N appliquée diminue. Dans la zone soudano-sahélienne, l'efficacité de l'utilisation de l'azote est faible pour la majorité des cultures et on retrouve moins de 50 % de N appliqué au moment des récoltes (Bationo et Vlek, 1997).

L'application de NPK au poquet à un taux de 4 kg P ha⁻¹ (discutée plus haut) permet d'apporter 0,9 g N et 0,4 g P par poquet (pour une densité de semis de 10000 poquets ha⁻¹). Ces quantités couvrent 10 à 20 % des besoins nécessaires en N d'après Buerkert et al. (2001) et 30 % des besoins en N si ceux-ci sont assimilés au taux optimum cité par Christianson et Vlek (1991).

L'**urée** (46 % de N), le **CAN** (ammonitrate de calcium, 26 % de N) et le **DAP** sont les sources les plus communes d'azote dans la région. Bationo et al. (2003) dressent les conclusions suivantes :

- les quantités de N appliquées retrouvées dans la plante sont faibles (25 à 30 %) ;
- les pertes en N sont plus élevées pour l'urée que pour CAN probablement à cause de la volatilisation de l'ammonium (la moitié de N dans le CAN est sous forme non volatile);
- le CAN possède une plus faible teneur en N que l'urée mais permet un prélèvement de N par le mil plus important.

Dans une autre étude, Bationo et Vlek (1997) rapportent que le CAN et le nitrate de potassium permettent d'obtenir des taux de récupération plus élevés que l'urée. Ils notent également que l'application de P et de chaux améliore le taux de prélèvement de N par les cultures.

La réponse aux engrais azotés est affectée par la pluviométrie de mi-saison. Christianson et al. (1990) (cités par Bationo et al., 2003) montrent qu'il existe une période de 45 jours coïncidant avec les stades d'initiation de la panicule (allongement des entre-nœuds) et d'épiaison pendant laquelle l'utilisation de N est particulièrement dépendante de la pluviométrie.

Il existe divers coûts et risques associés à la fertilisation azotée tels que la brûlure (chimique) des plantules en cas de teneur en eau du sol insuffisante, ce qui augmente les pertes en rendement si la pluviométrie est faible. Toutefois, une carence en N va rapidement limiter la croissance lorsque la plante augmente son utilisation de P. Les agriculteurs peuvent limiter le risque associé à la fertilisation azotée en l'appliquant plus tard dans la saison en fonction de la pluviométrie en début de saison (Shapiro et Sanders, 1998). Une application en deux fois (split application) permet d'augmenter considérablement l'efficacité de l'utilisation de N (Bationo et Vlek, 1997).

La fertilisation azotée est réputée pour stimuler le tallage et contribuer à l'augmentation de rendement par une augmentation du nombre de panicules. De Rouw (2004) montre que les rendements en grain augmentent avec la fertilisation (10 kg P sous forme SSP avant semis et 50 kg N sous forme d'urée appliquée en deux fois au démarrage et à la floraison) principalement à cause de l'augmentation du nombre de panicules car le tallage est stimulé par N. Ce nombre de panicules est élaboré dans la première moitié du cycle de croissance (entre 30 et 50 JAS) tandis que le nombre de grains et le poids des grains sont des composantes du rendement dépendant de la seconde moitié du cycle. Le nombre de grains et le poids des grains sont également influencés par la fertilisation, signe que celle-ci permet de fournir des nutriments sur une longue période, jusqu'à la deuxième moitié du cycle. Toutefois, la contribution des talles au rendement en grain n'augmente pas sous l'effet de la fertilisation dans les sols les plus pauvres. Dans ceux-ci, l'augmentation de rendement est obtenue en réduisant le nombre de poquets stériles (de Rouw, 2004).

c) Fixation biologique de N

La fixation biologique de N par les légumineuses est une technique complémentaire à l'utilisation chère et risquée des engrais azotés (Bationo et al., 1998). Le cas de la culture associée mil-niébé, souvent mentionné pour ses nombreux effets bénéfiques, est discuté plus loin.

Le mil peut également former des associations rhizosphériques avec des bactéries diazotrophes. La capacité de ces bactéries à fixer l'azote atmosphérique dépend du nombre de bactéries hétérotrophes présentes en compétition pour le carbone organique comme source d'énergie (Esse et al., 2001).

d) N sous forme organique

Les effets de l'application de fumier et d'urée ainsi que ceux de l'application de résidus de récolte sont présentés plus loin. Pendant la saison sèche, la minéralisation de la matière organique permet de constituer des réserves appréciables en nitrate pour la prochaine culture. Lorsque les pertes en N ne sont pas trop importantes (lixiviation, volatilisation, etc.), davantage d'azote pourrait être absorbé lors d'apports organiques que lors de l'application d'engrais azotés (Van Duivenbooden, 1996).

1.3. Potassium

Bien que les teneurs en potassium échangeable soient très faibles dans les sols en Afrique de l'Ouest, très peu d'études ont montré une réponse positive du mil au K (Traoré et al., 2002). Un apport de 25 kg K ha⁻¹ est toutefois recommandé pour une densité de semis de 10000 poquets ha⁻¹ (Hafner et al., 1993). Les pailles de mil sont également une source de K.

D'après van Duivendooden (1996), la distribution possible du potassium se répartit en quatre fractions :

- intégré à la matière organique du sol ;
- lessivé ;
- intégré à la fraction minérale du sol (échanges ioniques et adsorption spécifique ;
- absorbé par la plante (24 à 38 % en moyenne).

1.4. Autres éléments minéraux

Quelques études ont mis en évidence l'importance du soufre pour la culture du mil. Les engrais contenant du S sont cités dans le Tableau 3. Le SSP combine l'apport en P et S mais les autres principaux engrais utilisés dans le Sahel (TSP, NPK, DAP, CAN, urée) ne contiennent pas de S.

1.5. Effet des engrais sur l'efficacité de l'utilisation en eau

Généralement, l'augmentation des rendements due à l'utilisation d'engrais mène à une augmentation de l'efficacité de l'utilisation en eau. Sous les conditions climatiques locales et les sols sableux, toute l'eau disponible n'est généralement pas utilisée par la culture. Le drainage est estimé à 100-200 mm par an et l'évapotranspiration (ET) à 200-400 mm par an dans la zone sahélienne.

Lorsqu'un événement pluvieux est inférieur à 5 mm, la plupart de l'eau est perdue par évaporation. En général, 35 à 45 % de la pluie est évaporée directement du sol dans les cultures de mil (une plus grande proportion sera évaporée si la pluie est plus faible) (Bationo et al., 1998).

L'ET est largement conditionnée par les conditions météorologiques et peut être considérée comme quasi constante et indépendante des niveaux de rendements. L'ET n'étant pas fort affectée par les pratiques de gestion de la culture, tous les facteurs qui augmentent les rendements auront pour effet d'augmenter également l'efficacité de l'utilisation de l'eau (EUE), qui est le rapport entre le rendement en grain et l'utilisation en eau totale (exprimé en $\text{kg ha}^{-1} \text{mm}^{-1}$). L'effet bénéfique des engrais est attribué à une croissance initiale des feuilles plus rapide, ce qui permet de réduire les pertes par évaporation directe de l'eau du sol et d'augmenter l'EUE (Bationo et al., 1998 ; Shapiro et Sanders, 1997). L'application d'engrais permet d'augmenter la quantité d'eau transpirée et d'accroître la productivité.

2. Amendements organiques

De nombreuses études indiquent un déclin rapide de la qualité du sol si la culture de mil a lieu en continu et en l'absence d'amendements organiques. L'acidification peut provenir du prélèvement excessif d'éléments nutritifs, de la perte du pouvoir tampon résultant de la diminution du contenu en matière organique du sol, du lessivage des nutriments ainsi que de la perte de sol et de matière organique causée par l'érosion éolienne.

2.1. Matière organique du sol

a) **Humification et minéralisation**

Les organismes vivants sont les premières sources de N et C organiques. Ils produisent des résidus morts, de la litière ou des amendements qui se décomposeront en matière organique du sol (MO) et autres substances par le processus **d'humification**. La MO du sol (aussi appelée humus) est intimement liée à la fraction minérale du sol et elle ne présente plus la structure originelle des cellules propres aux organismes vivants.

La MO est totalement envahie par des micro-organismes vivants qui participent activement avec la mésofaune à des processus de transformation. La perte de substances organiques par transformation chimique ou biologique est appelée **décomposition** ou **minéralisation**.

Le terme « **apport** » est utilisé pour désigner les quantités de C ou de N qui entrent effectivement dans un des compartiments de la matière organique. Dans le cas de la MO, les apports représentent les quantités qui entrent dans le compartiment MO du sol et non la quantité totale de résidus végétaux qui sont ajoutés au sol (**apport de matière organique fraîche**). En effet, une partie de ces résidus peut être oxydée et ne jamais atteindre le stade de MO (Van Wambeke, 1995).

Les facteurs climatiques et les propriétés du sol influencent les teneurs en MO. Les taux de minéralisation de la MO varient avec des facteurs biologiques, climatiques et édaphiques tels que l'origine des apports organiques, la température du sol, l'activité des micro-organismes, les types de faune du sol, les conditions d'humidité, l'apport en oxygène et les propriétés de la fraction minérale du sol. Le ratio C_{org}/N est important pour évaluer la qualité des apports de matière organique fraîche. La Figure 16 schématise les flux de N dans le système cultural sahélien.

En zone sahélienne, C_{org} et N total sont généralement faibles à cause de la faible production de biomasse et des taux élevés de minéralisation. De plus, il y a souvent un manque de synchronicité entre le moment où les éléments minéraux sont libérés par la minéralisation et le moment où la croissance des plantes demande ces nutriments, beaucoup de nutriments sont alors perdus. La totalité du N minéralisé, par exemple, n'est en réalité pas disponible entièrement pour les plantes, une partie peut lessiver, volatiliser ou subir la dénitrification. La synchronicité peut s'atteindre en manipulant la demande de la plante ou en contrôlant la quantité et la qualité des intrants organiques (Bationo et al., 1998).

En début de saison des pluies, on observe un flux de N libéré par la forte minéralisation. Ce flux peut apporter entre 13 et 183 kg N ha⁻¹ et dépend de l'intensité et de la fréquence des premières pluies. Les plantules sont généralement peu ou pas développées pour utiliser l'azote disponible si tôt dans la saison et la majorité de cet apport azoté peut être perdue par lessivage (Bationo et Vlek, 1997).

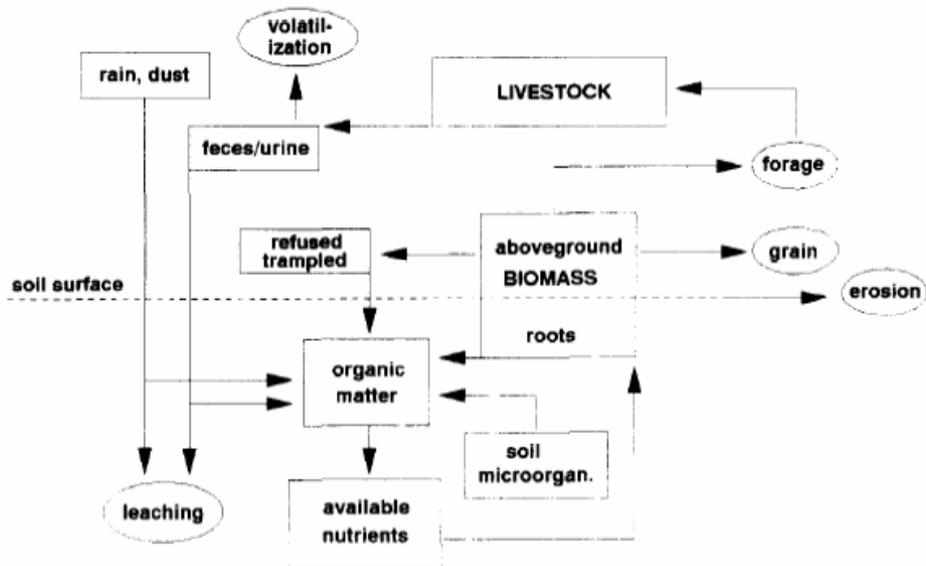


Figure 16. Flux de N dans les champs cultivés et les pâturages du Sahel (les rectangles sont les inputs, les ovales sont des outputs) (source : Powell et al., 1996)

b) Changement dans les teneurs en matière organique du sol

La plupart des **diminutions en matière organique du sol** se produisent lorsque les terres sous végétation naturelle sont défrichées pour être cultivées et lorsque le sol est laissé sans protection contre les hautes températures. La quantité d'éléments nutritifs recyclée en une année entre les cultures et les sols est une composante critique de la fertilité du système cultural. Cette quantité dépend de la teneur en MO du sol et du taux de minéralisation. On comprend donc que la production de biomasse soit généralement le facteur critique permettant le maintien d'un niveau adéquat de matière organique du sol dans un système cultural (Van Wambeke, 1995).

Lorsque les sols se détériorent suite à un épuisement en éléments nutritifs, la matière organique est souvent le constituant critique qu'il est nécessaire de restaurer pour créer des conditions optimales de croissance des racines. **L'augmentation de la teneur en matière organique du sol** peut se faire par l'application de pratiques agricoles dont les conditions maximalisent les apports et/ou réduisent la constante de décomposition. L'application de fumier, d'engrais verts (légumineuses) ou de résidus végétaux et la pratique de la jachère permettent un apport supplémentaire en matière organique dans le compartiment MO du sol.

Les apports en matière organique contribuent d'une manière substantielle à la productivité du sol : ils constituent une source d'éléments nutritifs pour les plantes, permettent d'améliorer la disponibilité en P, provoquent une meilleure croissance racinaire, protègent les

plantules contre l'ensevelissement lors de tempêtes et réduisent l'encroûtement de la couche superficielle du sol (Bationo et Buerkert, 2001). De faibles teneurs en MO dans le sol peuvent conduire à des limitations sévères dans la croissance des plantes et à la détérioration des terres de culture. Des pratiques d'aménagement peuvent cependant remplacer certaines fonctions de la matière organique : les engrais peuvent par exemple corriger des déficiences nutritionnelles.

c) **Maintien de la matière organique du sol dans le système cultural du Fakara**

D'après l'étude de Hayashi et al. (2005), menée dans 3 villages du Fakara (Banizoumbou, Kodey et Tigo Tegui), les agriculteurs distinguent la gestion intensive de la fertilité (parcage, transport de fumier et application de résidus de culture) et la gestion extensive (jachère). Sur la superficie totale étudiée, la distribution géographique des terres agricoles basée sur la classification des pratiques de gestion de la fertilité était de 66 % en pratique de jachère, 18 % utilisant le parcage et 16 % le fumier transporté. Hiernaux et al. (1997) rapportent quand à eux que 30 à 62 % de la superficie est cultivée et que les agriculteurs appliquent du fumier (par transport de fumier ou par parcage) environ une fois tous les 4 ans sur 10 à 12 % de leurs champs.

Les paysans locaux soulignent trois problèmes importants :

- 1) Le choix d'une pratique de gestion de la fertilité dépend des conditions environnementales (conditions édapho-climatiques).
- 2) La matière organique utilisable pour la gestion de la fertilité est peu disponible.
- 3) Les périodes de jachère sont sans cesse raccourcies et la fertilité du sol ne peut pas être restaurée suffisamment, le sol se dégrade donc de plus en plus.

Le fumier transporté est généralement utilisé dans des champs situés à moins de 1 km de la case tandis que la pratique de la jachère s'effectue surtout pour des champs éloignés de plus de 2 km de l'habitation. Le parcage se pratique à des distances intermédiaires, pas trop près de la case à cause des conflits entre agriculteurs et éleveurs et pour éviter des dommages créés par les bêtes aux possessions du fermier ainsi que l'ingestion par celles-ci de tissus ou sacs plastiques nombreux près des habitations. Les terres mises en jachère n'ont généralement pas accès aux pratiques de fumure à cause de l'éloignement et de la difficulté de transporter du fumier ou du manque d'eau pour les bêtes en parcage.

2.2. Pratique de la jachère

Quand la **jachère traditionnelle** était encore pratiquée, les éléments nutritifs pouvaient s'accumuler lors de longues périodes et une partie de ces nutriments était disponible pour les plantes lorsque la végétation était brûlée ou lors de la décomposition de la matière organique du sol (augmentation annuelle de 10 kg N ha⁻¹ dans le sol et 25 kg N ha⁻¹ dans la végétation sous savane) (Bationo et al., 1998) (Figure 17).

Environ 30 % des fermiers de l'Ouest du Niger cultivent leurs champs de façon permanente et moins de 10 % font des jachères de plus de 5 ans (Wezel et Haigis, 2002, cités par Schlecht et Buerkert, 2004) alors que 6 à 12 ans de jachère sont nécessaires pour restaurer la perte en nutriment causée par 3 ans de culture (Van Duivenbooden, 1996).

La durée de la jachère varie entre 2 et 4 ans (en général 3 ans de jachère suivi de 6 ans de culture) dans la région du Fakara (Hayashi et al., 2005). La persistance de la jachère se justifie par l'éloignement des champs par rapport au village et le manque de relations avec un éleveur (qui pourrait faire du parage).

On observe que la faune du sol est plus diversifiée et plus nombreuse dans les champs où est pratiquée la jachère que dans les champs fumés cultivés de façon permanente (Derouard, 1996, cité par de Rouw et Rajot, 2004). Or, ces organismes coprophages jouent un rôle indispensable dans la libération des nutriments contenus dans le fumier. De Rouw et Rajot (2004) notent que **tant que le système de jachère existe** (loin du village et sur sols plus lourds), le fumier est généralement appliqué sur les sols les plus pauvres (près du village et sur sols plus sableux) pour permettre une culture permanente, tandis que sans apport de fumier des périodes de longue jachère sont indispensables pour restaurer le sol. **Lorsque le système de jachère disparaît** avec la pression accrue sur les terres arables causée par l'accroissement de population, les sols déjà cultivés depuis longtemps et très sableux sont abandonnés (effet du fumier insuffisant) et la culture continue sur les sols meilleurs (plus lourds) avec application de fumier.

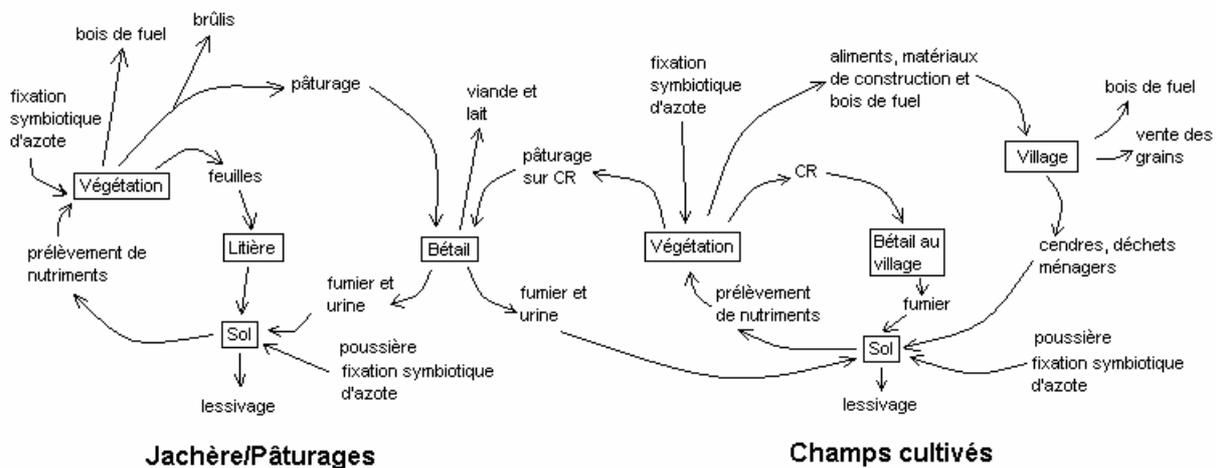


Figure 17. Cycle des nutriments dans le système agro-pastoral sahélien (adapté de Harris, 2002)

2.3. Application de résidus de culture (mulching)

L'application de résidus de récolte (CR : crop residue) durant la saison sèche permet d'améliorer la capacité d'infiltration de l'eau et la rétention en eau du sol, de diminuer l'érosion éolienne et hydrique, d'augmenter la CEC du sol, d'augmenter la fourniture lente d'éléments nutritifs aux plantes et de chélater le P fixé par les oxydes de Fe et Al (Schlecht et Buerkert, 2004). Le paillage de surface a un effet sur la diminution de la formation des

croûtes à la surface du sol, l'augmentation de la croissance et l'amélioration de l'approvisionnement des plantules en P et K (Muehlig-Versen et al., 1997). De nombreuses études ont également montré que la combinaison d'application de CR et d'engrais permet d'obtenir les plus hauts rendements (Bationo et al., 2000).

Les quantités généralement recommandées suite aux essais agronomiques sur le mulching sont de l'ordre de **2000 kg CR ha⁻¹** (Bationo et al., 2000). Le problème se situe au niveau de ce que les champs produisent réellement. Baidu-Forson (1995) (cité par Bationo et al., 2000) reporte que à Dantiandou, sur les 1200 kg ha⁻¹ de paille de mil produits à la fin de la saison de croissance seulement 250 kg ha⁻¹ étaient encore disponibles en début de saison des pluies l'année suivante pour la pratique du mulching. Environ 50 % de la disparition peut être attribuée au pâturage par les animaux et les 50 % restants sont utilisés dans la construction, comme combustible, vendus ou utilisés pour le mulching. L'augmentation de la biomasse au niveau des exploitations agricoles est importante pour pouvoir satisfaire la demande en CR.

L'application de CR constitue un moyen efficace pour réhabiliter des terres dégradées et est fréquemment pratiqué par les fermiers, à des échelles limitées toutefois. Le rôle de l'activité biologique et surtout celui des termites dans ce processus de régénération stimulé par la présence de résidus organiques est considérable (même s'il y a aussi un rôle de la modification des conditions de surface à cause du dépôt de sédiments). L'activité seule des termites permet de doubler l'infiltration cumulée en comparaison avec des parcelles paillées traitées à l'insecticide (Mando et al., 1996, cités par Bationo et al., 2000).

Le rapport C/N des pailles de mil est relativement élevé (> 100/1 d'après Kretzschmar et al., 1991). Ce rapport élevé a pour effet de stimuler l'activité microbienne du sol, y compris celle des nitrogénases, et d'augmenter la proportion de bactéries diazotrophes dans la rhizosphère par rapport aux hétérotrophes (Hafner et al., 1993). D'autre part, l'application directe d'une grande quantité de pailles peut avoir des effets négatifs en immobilisant N durant la minéralisation par les micro-organismes (dont le rapport C/N est proche de 10) et causant une « faim en N » chez les plantes. Vu les faibles quantités de CR généralement appliquées, le problème d'immobilisation de N est cependant peu important au Sahel.

2.4. Agro-foresterie et association avec des légumineuses

La proximité d'arbres peut protéger la culture des vents de sables. Certaines espèces sont en outre fixatrices d'azote atmosphérique (*Acacia albida*) et la retombée des feuilles sur les champs de mil permet un apport fertilisant (Bationo et al., 1998).

La culture associée de légumineuse et de céréale est souvent mentionnée pour ses nombreux effets bénéfiques par rapport à la monoculture (Bationo et al., 1998). L'azote produit par la fixation symbiotique chez les légumineuses est un fertilisant « gratuit » pour le système.

Entre autres, les rotations céréales-légumineuses permettent d'augmenter l'efficacité d'utilisation en N par la plante et de baisser les quantités de N à appliquer sous forme d'engrais. Dans la zone sahélienne, Bationo et Vlek (1997) rapportent des efficacités

d'utilisation d'engrais de 20 % sous culture permanente et de 28 % lorsque le mil est cultivé en rotation avec le niébé. Une alternative à la rotation annuelle est la culture associée en rangs avec rotation entre les rangs d'une année à l'autre. Cette technique permet d'accroître les rendements de mil en exploitant les effets résiduels des engrais appliqués au niébé (Biielders et al., 2002).

La culture associée mil-légumineuse proprement dite est largement pratiquée. L'interculture de niébé est semée peu après le mil, lorsque les animaux sont interdits de divagation dans les champs et lorsque le risque de compétition pour l'eau et les éléments minéraux diminue (le mil étant à un stade plus avancé et la saison des pluies étant mieux installée). Bationo et Ntare (2000) notent toutefois que, dans cette interculture traditionnelle, la densité du niébé est faible et sa contribution à la fixation biologique de N pourrait être négligeable. D'après eux, il n'y a pas de preuve directe d'un transfert de N de la légumineuse vers le mil. Dans le cas d'une rotation, par contre, la culture suivante pourrait bénéficier d'effets résiduels de N fixé par la légumineuse. Les gousses et fanes de niébé étant exportées du champ, ces effets proviendraient du système racinaire. Certains auteurs attribuent l'effet bénéfique des rotations à l'habilité des exsudats racinaires de certaines légumineuses à solubiliser le P (Gardener et al., 1981, cités par Bationo et Ntare, 2000).

L'intensification de la culture de niébé peut être un moyen pour augmenter les revenus des exploitations agricoles à condition que l'accès à un marché soit garanti. Il faut noter que l'adoption de technologies d'intensification des cultures peut être améliorée si elle est dirigée sur des cultures de rente (niébé) plutôt que sur des cultures purement vivrières (mil). D'autre part, l'intensification de la production de niébé ne peut pas se faire aux dépens de la production de mil dans un contexte de pénurie alimentaire (Biielders et al., 2002).

2.5. Pratique du parcage (coralling)

a) **Technique**

L'application de fumier fut adoptée pour permettre la culture permanente des champs, c'est-à-dire sans période de jachère. La technique est pratiquée par les fermiers Zerma assez aisés qui possèdent du bétail et par quelques familles Peuls installées dans la région avec leurs troupeaux. Il s'agit de placer pour la nuit le bétail sur les champs qui ne sont pas cultivés. Après la récolte, le bétail se nourrit des résidus de culture et mauvaises herbes et reste au champ tant que la nourriture y est suffisante. Lorsque ce n'est plus le cas, le berger mène le troupeau vers des pâturages mais retourne au champ la nuit. Les animaux sont libres de se déplacer sur le champ ou, si on désire concentrer l'application de fumier en un point de faible fertilité par exemple, les veaux sont placés dans un enclos qu'on déplacera au fur et à mesure sur le champ. 50 à 80 % de N excrété par les animaux se retrouve dans l'urine, également très riche en K, tandis que presque la totalité du P excrété sera présent dans le fumier (Whitehaed, 1970, cité par Ikpe et al., 1999 ; Powell et al., 1996). Les déjections

sèchent sur la surface du sol et restent intactes, elles sont incorporées au sable uniquement lorsque qu'elles sont piétinées par le bétail.

Une variante demandant plus de main-d'œuvre consiste à placer les animaux de manière systématique dans des enclos distribués sur l'entièreté du champ et déplacés lorsque la quantité de fumier déposée dans un enclos est jugée satisfaisante. Cette technique permet aux déjections et à l'urine d'être incorporées au sol à l'endroit du parcage par piétinement et évite ainsi une perte de nutriments (de Rouw et Rajot, 2004).

Le principal frein à ces techniques est qu'elles signifient un surplus de travail (ou de coût pour un contrat de parcage auprès d'un éleveur) alors que les agriculteurs sont généralement trop pauvres pour posséder suffisamment de bétail. Les agriculteurs riches et les éleveurs sédentaires accumulent de la matière organique dans leurs champs aux dépens des plus pauvres dont les champs se dégradent peu à peu car ils fournissent du fourrage aux animaux qui y passent sans que les éléments nutritifs ne leur soient restitués (Neef, 1997).

D'après Schlecht et Buerkert (2004) le fumier n'est pas exploité comme il le pourrait, ni en termes de la quantité effectivement disponible ni en terme de son effet résiduel. La petite taille des troupeaux appartenant à un individu, la peur du vol de bétail et le manque de moyens de transport pour le fumier empêchent une utilisation plus efficace des pratiques de coralling et de fumier transporté.

b) Quantité, qualité et effets du fumier

Au Niger, les fermiers appliquent du fumier à un taux allant de 1300 kg MS (matière sèche) ha⁻¹ tous les 3 ans à 3800 kg MS ha⁻¹ tous les 2 ans (les taux dans les parcages pouvant atteindre 10000 kg MS ha⁻¹) (Powell et Williams, 1993 ; Dosso et al., 1996, cités par de Rouw et Rajot, 2004). Dans la zone d'étude (Banizoumbou), l'apport en fumier de zébu dans les champs où le parcage est pratiqué est estimé à 1100 kg MS ha⁻¹ par année et à 100 kg MS ha⁻¹ sur les champs non fumés recevant du fumier par passage de troupeaux. Les **quantités recommandées** pour une production durable de mil varient de 5000 kg MS ha⁻¹ par année après une période de jachère (Pichot et al., 1981), 9000 kg MS ha⁻¹ tous les 3 ans (Affholder, 1995) et de 2100 à 3200 kg MS ha⁻¹ tous les 2 ans (Williams et al., 1995) (cités par de Rouw et Rajot, 2004).

Appliqué en quantités suffisantes, le fumier permet d'augmenter les rendements en grain la plupart des années. L'augmentation du rendement passe toujours par une stimulation du tallage et une augmentation du nombre de panicules plutôt que par des augmentations des autres composantes du rendement (de Rouw et Rajot, 2004). Les conditions de croissance sont stimulées au début du cycle végétatif car le fumier protège mécaniquement le sol, en piégeant des particules mobiles pendant les tempêtes et réduisant l'encroûtement, et favorise donc l'infiltration tout en apportant son lot d'éléments minéraux.

De Rouw et Rajot (2004) notent que l'application de fumier à 500-1000 kg MS ha⁻¹ correspondent à 10 kg N, 1,2 kg P et 5 kg K ajoutés au sol. Ces niveaux de N et P et K sont faibles et la plupart des nutriments sont disponibles pour la culture en début de saison seulement. Dans leur étude, l'effet positif du fumier se marque par une faible augmentation du

rendement et par une augmentation de 50 % des résidus de culture via une stimulation du tallage et donc de la production de biomasse. Un apport en nutriments supplémentaire en deuxième partie du cycle végétatif permettrait d'augmenter les rendements en grain. Cela peut être atteint par des quantités plus grandes de fumier appliquées en début de saison qui auraient un effet plus prolongé ou par des apports d'engrais organique ou inorganique en milieu de saison. L'application de fumier permet également de protéger mécaniquement la surface du sol pendant les premiers mois de la saison culturale, lorsque le sol est peu couvert par la culture, et de piéger les sables éoliens durant les tempêtes (de Rouw et Rajot, 2004).

Gandah et al. (2003) montrent que des taux d'application de fumier de 1500 à 17000 kg MS ha⁻¹ sur des petites zones de champ permettent d'augmenter les rendements en grain de 500 kg ha⁻¹ sur les champs fumés plus de 6 ans auparavant et de 1100 kg ha⁻¹ sur les zones de parage récent. Ils notent les effets positifs du coralling jusqu'à 4 ans après l'application, contrairement à de Rouw et Rajot (2004) qui rapportent l'absence d'effet résiduel du fumier (appliqué à 5000 kg MS ha⁻¹) sur les rendements du mil. McIntire et al. (1992) (cités par Esse et al., 2001) rapportent une augmentation de rendement en grain de 15-86 kg par tonne de MS de fumier. Agyemang et al. (1993) (cités par Harris, 2002) notent une augmentation de 30 kg par tonne de MS de fumier.

Michels et Biolders (2006) rapportent des augmentations de rendements en grain de 188 % suite à l'application de fumier de parage (10000 kg MS fumier + 1250 l urine ha⁻¹) par rapport aux parcelles paillées (2000 kg CR ha⁻¹). La croissance racinaire a également été stimulée dans l'entièreté du profil d'enracinement et l'efficacité d'utilisation de l'eau (EUE) a augmenté de 2,3 pour le témoin à 10,0 kg MS totale ha⁻¹ mm⁻¹ suite à l'application de fumier et d'urine.

Esse et al. (2000) montrent que les macro-organismes jouent un rôle prédominant dans la phase initiale de décomposition du fumier. Observer la présence et l'activité des insectes coprophages permet de vérifier que les plantes bénéficient du fumier durant la saison de croissance (de Rouw et Rajot, 2004). Ils remarquent également que les taux de libération de N et P suivent les taux de décomposition du fumier tandis que les taux de libération de K baissent beaucoup plus rapidement. Le ratio K/ECEC est une variable répondant à l'application de fumier. K est fort présent dans le fumier et appliqué au sol, cet élément très soluble s'adsorbe sur le complexe d'échange (de Rouw et Rajot, 2004). D'autre part, les taux de décomposition diminuent avec le temps : les composants restants sont plus difficiles à minéraliser (la proportion de lignine et polyphénols étant plus importante).

L'azote présent dans l'urine est rapidement disponible pour les plantes tandis que le fumier requiert une décomposition plus avancée avant que N ne devienne disponible. La transformation de N présent dans l'urine (hydrolyse de l'urée, apparition d'ammonium et puis de nitrate) est complète en 4 jours mais environ 30-50 % de N sont perdus par volatilisation ammoniacale (Stillwell et Woodmansee, 1981, cités par Ikpe et al., 1999). L'application d'urine a pour effet d'élever le pH du sol, particulièrement les premières semaines après application, ce qui permet de dissoudre les complexes entre P et les oxydes de Fe et Al et d'augmenter la disponibilité de P pour les plantes (Powell et al., 1998).

Comparé au P contenu dans la biomasse, le P contenu dans la fumure minéralise plus rapidement dans le sol (Powell et Valentin, 1997).

Brouwer et Powell (1998) insistent sur le fait que la quantité de fumier et d'urine nécessaire pour obtenir de bons rendements ($> 800 \text{ kg ha}^{-1}$) dépend de la position topographique de la parcelle et de la qualité du fumier. Ils conseillent de concentrer le fumier et l'urine d'ovidés en bas des champs, là où l'infiltration et l'acidification des sols sont plus élevées, à un taux inférieur à 2800 kg ha^{-1} . L'urine d'ovidés a un effet plus alcalinisant que l'urine de bovidés. L'application de fumier de bovidés (2500 kg ha^{-1}) doit être effectuée sur les parties plus élevées du champ, là où l'infiltration est moindre et le ruissellement important.

La qualité du fumier dépend du contenu nutritif présent dans le foin et du type d'animal. Esse et al. (2000), entre autres, montrent que le fumier de bovins possède une concentration initiale en N supérieure à celle du fumier d'ovins et de caprins et qu'il se dégrade plus vite. D'après Harris (2002), la grande variabilité entre exploitations dans la composition du fumier et le type de sol rend difficiles les recommandations en termes de quantités de fumier à appliquer. Idéalement, le parage devrait avoir lieu un mois après le début de la saison des pluies : quand la qualité de la pâture augmente à cause de l'humidité de l'air, la qualité du fumier augmente aussi par rapport au fumier de saison sèche, mais ce n'est pas possible : le parage ne peut avoir lieu en même temps que la culture (Harris, 2002).

c) Limites de l'application de fumier

L'application de fumier à $3000\text{-}14000 \text{ kg MS ha}^{-1}$ correspond à un apport de $43\text{-}199 \text{ kg N ha}^{-1}$ et $4,8\text{-}22,4 \text{ kg P ha}^{-1}$ (Brouwer et Powell, 1998, cités par Gandah et al., 2003). Si le fumier est disponible, une technique de gestion alternative consiste à **diminuer les taux d'application** pour **augmenter l'aire traitée** et donc augmenter les rendements sur une plus grande superficie tout en réduisant le risque de lessivage d'éléments (si la pluviométrie est importante) et les dommages causés aux cultures en cas de pluviométrie faible et de surdosage de la fumure (Gandah et al., 2003 ; Powell et al., 1998). Esse et al. (2001) conseillent d'adapter les taux d'application de fumier selon la pluviométrie, la présence de termites et le type de pratique (parage/fumier transporté). Une pluviométrie élevée et la présence de termites font disparaître plus vite le fumier en saison des pluies. Des quantités parfois considérables d'éléments nutritifs ayant disparu se retrouvent piégées dans les termitières et ne seront disponibles pour les plantes que lorsque celles-ci auront été détruites ou abandonnées.

La pression sur les pâturages risque d'augmenter avec l'augmentation des terres cultivées étant donné que $10\text{-}40 \text{ ha}$ de pâturage sont nécessaires pour fertiliser 1 ha en utilisant 9 vaches durant la saison sèche (Powell et al., 1996). L'utilisation d'engrais chimiques en combinaison avec un apport en éléments nutritifs organiques est donc proposée afin de **réduire le besoin en superficie de pâturage** et d'augmenter la capacité de ces sols sableux à stocker plus d'éléments nutritifs (Powell et al., 1996). Hiernaux et Ayantunde (2004) rapportent un **effet synergique de la combinaison d'apports organiques et minéraux** sur les rendements en mil dans le Fakara. L'application localisée de P (2 g DAP par poquet)

combinée à l'application de 6000 kg MS fumier ha⁻¹ a permis d'augmenter les rendements en grain de 350 kg ha⁻¹ par rapport à la somme des rendements obtenus par application seule de DAP et par application seule de fumier.

D'autre part, Powell et al. (1996) notent que laisser tous les résidus de récolte sur les champs permet d'obtenir des meilleurs rendements plutôt que de les laisser consommer par les animaux qui laisseront leur fumier/urine aux champs. Toutefois, cette stratégie n'est pas envisageable pour les agriculteurs, étant donné qu'il n'y a pas de fourrage alternatif durant la saison sèche.

La connaissance de la durée du séjour d'animaux dans un corral spécifique, la variation du contenu nutritif dans le foin, la variation de qualité de fumier produite, le nombre et le type d'animaux ainsi que le type de sol doit permettre d'estimer l'apport nécessaire de fumier en un site particulier. Cet apport doit prendre en compte d'autres contraintes importantes comme la charge de travail et la disponibilité en terres de pâturage et en fumier (Gandah et al., 2003). Les variations en termes de disponibilité de pâture vont particulièrement affecter la quantité et la qualité du fumier produit par un animal. Les concentrations en MO, N et P dans le fumier seront plus faibles durant la saison sèche (Powell et al., 1996). Schlecht et al. (1997) rapportent que les quantités de N excrétées sont plus élevées de jour que de nuit et que les défécations et urinations sont plus fréquentes au lever et à l'abreuvement. Ceci suggère que des pratiques de gestion du bétail telles que le maintien des animaux sur le site du parcage une trentaine de minutes après leur lever, et l'épandage de litière près des points d'eau, permettraient une récupération plus complète du fumier et de l'azote pour améliorer la fertilité des sols.

2.6. Application de fumier transporté

Une variante à la pratique du coralling demandant encore plus de travail consiste à récolter le fumier des étables et les déchets ménagers près de l'habitation, de les transporter jusqu'au champ et de les répandre sur la superficie à cultiver (de Rouw et Rajot, 2004). Les contraintes majeures sont le transport et la disponibilité du fumier. A mesure que la superficie cultivée augmente, la superficie de jachère/pâturage nécessaire à nourrir le bétail se limite et la fourniture en fumier également (Figure 17) (Harris, 2002).

Le fumier est appliqué après la récolte ou en début de saison sèche. Le fumier transporté contient des déjections et urines, mais aussi des déchets ménagers, des cendres et des pailles de mil. Les fermiers ne cherchent en général pas à appliquer le fumier de façon homogène, surtout lorsque le fumier est peu disponible. Ils l'appliquent en des lieux ciblés de faible fertilité. Les applications varient chaque année (Harris, 2002). La distribution inégale du fumier entraîne une variabilité dans la croissance du mil sur des petites distances. Schlecht et Buerkert (2004) rapportent des taux d'application de fumier transporté de 630 kg MS ha⁻¹ sur des lieux précis. Ils notent un effet de fertilité résiduelle pendant au moins deux saisons.

La qualité du fumier, outre son contenu, dépend des conditions de stockage qui affectent la perte de l'urine ou la décomposition anaérobie du fumier (Harris, 2002). Un

désavantage de cette technique est que les taux de N dans le fumier transporté sont plus faibles que dans le fumier obtenu par parcage, le NH_3 présent dans l'urine étant le plus souvent perdu par volatilisation avant l'épandage (Esse et al., 2001). Powell et William (1994) (cités par Bationo et al., 1998) ont montré que l'urine pouvait aussi être « piégée » par les résidus de culture à haut ratio C/N utilisés comme foin dans les étables et les corrals. Nzuma et Muwira (2000) (cités par Harris, 2002) montrent qu'un lit de paille permet de réduire les pertes en NH_3 de 80 %.

Il faut savoir que les contraintes de charge de travail et de disponibilité du bétail nomade rendent difficile le remplacement du coralling prolongé en un endroit par des applications de fumier plus dispersées. Par contre cela peut être effectué plus facilement dans le cas du fumier transporté. Le transport manuel de fumier 4 semaines après semis une fois par an à 2000-3000 kg MS ha^{-1} vaut a priori mieux que des taux beaucoup plus importants une fois tous les 10 ans si on désire éviter les pertes d'éléments minéraux pour les plantes (Esse et al., 2001).

D'autre part, comme dans le cas du parcage, l'extension des intervalles entre application de fumier (de 1-2 à 3 ans) permettrait d'augmenter la superficie des champs bénéficiant de cette pratique de gestion de fertilité et d'éviter les pertes liées à une surdose locale de fumier (Schlecht et Buerkert, 2004)

Bien que ces techniques utilisant le fumier ne permettent pas d'ajouter des nutriments au système agro-pastoral en lui-même, elles sont néanmoins un moyen de transfert et de recyclage d'éléments minéraux et de C_{org} à différentes échelles à l'intérieur du système. Il est important d'optimiser et d'intensifier ces techniques dans un contexte où les agriculteurs locaux ont peu accès aux autres formes de fertilisation (Esse et al., 2001).

3. Densités de semis

Différentes études recommandent des densités de semis plus élevées pour augmenter les rendements en cas d'utilisation d'engrais minéraux (Reddy, 1988 ; Klaij et al. 1994 cités par de Rouw, 2004 ; Shapiro et Sanders, 1997).

Au Sahel, les agriculteurs sèment à de faibles densités (10000 à 30000 plants ha^{-1}) et pratiquent le démariage pour favoriser le tallage et pour que les talles fertiles contribuent au rendement en grain (Bidinger et Raju, 2000). Le mil est la seule céréale haute où la sélection n'élimine pas le tallage. Le risque d'échec de la culture en cas de sécheresse durant l'initiation de la panicule ou de la floraison est amoindri (de Rouw et Winkel, 1997).

Une expérience à Banizoumbou montre que la densité de semis traditionnelle (5000 poquets ha^{-1}) produit des rendements élevés moins fréquemment que la densité recommandée (10000 poquets ha^{-1}) en conditions favorables (de Rouw, 2004). Par contre, il y a moins de risques de perte en rendement lors d'années plus sèches si la densité de semis est plus faible même si les rendements en grain moyens sont plus faibles. Une densité de semis plus faible stimule plus le tallage que la fertilisation par N et P. Les risques ont été réduits principalement par le développement déphasé des tiges principales et des talles secondaires. La contribution

des panicules des talles au rendement en grain passe de 60 % à 20 % lorsque la densité est plus élevée (de Rouw, 2004). Winkel et Do (1992) remarquaient déjà que le nombre et la survie des talles est inversement proportionnel à la densité de semis.

D'après de Rouw (2004), les agriculteurs sont conscients que l'espacement et la fertilisation stimulent le tallage et préfèrent les appliquer ensemble. De Rouw (2004) indique que, dans les conditions de mise en culture de terres marginales comme au Sahel, une densité de semis élevé n'est pas vraiment nécessaire pour obtenir un rendement élevé. Une telle densité réduit le tallage et rend la culture plus vulnérable aux sécheresses et aux contraintes biotiques (de Rouw, 2004).

4. Variétés améliorées

De nombreuses études recommandent l'utilisation de variétés à cycle court (90-100 jours) pour remplacer les cultivars locaux, surtout si les pluies sont tardives (Reddy, 1988 ; Klaij et al. 1994 cités par de Rouw, 2004 ; Buerkert, 1995). Si un mélange de variétés à cycle courts et longs étaient disponible, les fermiers pourraient adapter le choix de la variété à semer en fonction de la date de la première pluie (Shapiro et Sanders, 1997).

Les variétés à cycle court sont cependant peu utilisées. D'après de Rouw (2004), cela est expliqué par le fait que les isohyètes ont glissé ces 50 dernières années, le climat au Sahel devient plus sec. Ce récent changement de climat favorise les sécheresses de mi-saison. En effet, la diminution de la pluviométrie annuelle depuis 1970 est causée par une perte de 30 % des pluies dans la période de pluviométrie maximale, tandis qu'il n'y a pas de réduction de la longueur totale de la saison de croissance.

5. Combinaison de techniques

Pour redresser les bilans négatifs en nutriments il faut développer des systèmes de gestion intégrée de ces nutriments, c'est-à-dire manipuler judicieusement les processus d'entrée et de sortie des nutriments. Tous les exemples montrent que même si l'application d'engrais inorganiques est un bon moyen d'augmenter les rendements, les engrais minéraux ne peuvent pas seuls soutenir ces rendements à long terme. D'autre part, les techniques qui recyclent les nutriments ne permettent pas de compenser seules les pertes liées à l'exportation de la récolte. Une production durable pourra être obtenue lorsque les engrais minéraux sont combinés avec d'autres technologies comme l'application de résidus de culture ou de fumier (Bationo et al., 1998 ; Hayashi et al., 2005).

L'application de résidus de culture, par exemple, est limitée par la disponibilité en pailles de mil. Or, même l'utilisation de faibles quantités d'engrais permet d'augmenter les rendements en paille dans les essais en milieu paysan. L'application de petites doses de P au poquet, couplée avec l'adoption de systèmes cultureux adaptés comme l'association avec le

niébé permet d'obtenir de bonnes augmentations en biomasse totale (Bationo et al., 2000). Remarquons que l'augmentation de production en vue d'accroître le recyclage d'éléments va conduire à une augmentation des pertes en nutriments (par l'exportation des cultures) si les techniques utilisées n'apportent pas également des avantages complémentaires (tels qu'un apport en P au sol, une meilleure protection contre l'érosion, etc).

6. Adoption des techniques

Les recommandations en termes de densité de semis, application de fertilisants inorganiques et variétés à cycle court ne sont pas suivies par les paysans. Cela est peut-être dû aux différences entre les priorités des chercheurs, qui veulent augmenter les rendements en moyenne et celles des paysans, qui cherchent à réduire la fréquence d'échec de la culture (à obtenir des rendements supérieurs à un rendement minimum). D'après de Rouw (2004), les pratiques augmentant les rendements et diminuant les risques d'échec de la culture tout en étant susceptibles d'être adoptées par les paysans locaux sont la faible densité de semis traditionnelle (couplée à l'application d'engrais ou non), la plantation de variétés à maturité précoce et tardive pendant la même saison et l'application de fumier. Les pratiques permettant juste d'augmenter les rendements (sans diminuer le risque d'échec de la culture) sont la densité élevée de semis (couplée à l'application d'engrais ou non), la mono-culture de variétés à maturité précoce et l'incorporation de fertilisants inorganiques dans les sols les plus pauvres.

D'autre part, les principales contraintes à l'adoption des technologies de production dans la zone sahéenne sont (d'après Traoré et al., 2002) :

- faible implication des producteurs dans le processus de génération et d'évaluation des technologies de production ;
- faible circulation de l'information entre partenaires ;
- poids des traditions ;
- faible contribution des services d'encadrement ;
- diversité des approches méthodologiques d'intervention des partenaires ;
- coûts des engrais et accessibilité ;
- coût des amendements organiques et accessibilité ;
- faible organisation des producteurs ;
- politique de prix au producteur, manque de marché solvable ;
- faible accès au crédit et à la micro-finance ;
- faible disponibilité de semences améliorées.

Il faut conclure que l'application de pratiques de gestion de la fertilité dépend à la fois de l'intérêt personnel porté à l'innovation, des revenus des ménages, de la sécurité foncière et de la dépendance face au climat. La dotation en bétail et terres paraît jouer un rôle crucial dans les pratiques de fertilité mises en place par les ménages individuels (Schlecht et Buerkert, 2004).

Des stratégies complémentaires doivent être encouragées, spécialement pour les agriculteurs les plus pauvres et face au déclin de la fertilité et à l'émigration de familles des régions les plus arides. Les recherches futures doivent se focaliser sur les raisons d'adoption ou de non adoption des techniques disponibles pour combattre la perte en nutriments.

En plus de la recherche, des interventions au niveau national et supranational sont nécessaires. Au niveau national, il faut créer un environnement qui contient des actions sur le thème du crédit, des actions post-récolte pour ajouter de la valeur au produit sortant des exploitations, du marketing sur les produits, ... Au niveau supranational, il faut revoir l'impact des programmes d'ajustement structurel et les accords généraux sur les tarifs et le commerce (Bationo et al., 1998).

7. Les mécanismes de résistance à la sécheresse du mil

Etant donné la dépendance de la culture face aux aléas climatiques, les mécanismes intrinsèques de résistance à la sécheresse du mil sont de première importance. La résistance est prise ici dans le sens agro-écologique de stabilité du rendement. La gestion de la fertilité peut être plus efficiente si on prend en compte les impacts des stress hydriques sur la croissance et le développement du mil.

Des épisodes de sécheresse peuvent avoir lieu à n'importe quel moment de la saison de croissance et leur variabilité spatiale est également considérable. Il faut cependant noter que des sécheresses en début, milieu ou fin de saison auront des impacts différents sur les pertes en production de grain.

7.1. Caractères morphologiques et physiologiques de résistance et évitement du mil à la sécheresse

a) **Efficiences hydrique du mil**

Le mil a un métabolisme de type C4 qui lui confère une efficacité hydrique double de celle des plantes en C3 (la carboxylation en 2 étapes des espèces en C4, en concentrant le CO₂ dans les cellules de la gaine, améliore le rendement de la Rubisco-carboxylase et donc, à conductance stomatique égale, l'assimilation photosynthétique).

L'**efficacité hydrique** dépend de la capacité d'assimilation photosynthétique de la feuille et de la conductance foliaire pour la vapeur d'eau. Une efficacité élevée, résultant d'une augmentation de l'activité photosynthétique relativement à la transpiration, peut accroître la production totale de MS et le rendement potentiel sans modifier la consommation en eau totale de la culture. Si l'augmentation de l'efficacité résulte d'un maintien de l'assimilation concomitant avec une diminution de la transpiration (en cas de stress hydrique)

elle se traduit par une économie des réserves en eau du sol ce qui permet d'éviter la déshydratation et une meilleure stabilité de la production de grains (Winkel et Do, 1992).

b) Résistance à la sécheresse

Les mécanismes permettant de maintenir l'efficacité hydrique malgré un épisode sec sont dits « de résistance ». La résistance du mil à la sécheresse est faible, il possède peu d'adaptations à la déshydratation comme l'ajustement osmotique ou la résistance des tissus. (de Rouw et Winkel, 1998).

Le **système racinaire profond** du mil constitue une bonne adaptation. La vitesse de progression du front racinaire est rapide, lui permettant de dépasser rapidement les horizons superficiels soumis directement à l'évaporation et d'atteindre, à la floraison, une profondeur d'enracinement importante constituant une réserve hydrique potentielle (1,5 m). La colonisation du sol par le système racinaire progresse jusqu'en fin de cycle et permet d'occuper l'ensemble du profil (horizons de surface riches en éléments minéraux et horizons profonds plus humides). La densité racinaire est toutefois parfois insuffisante pour utiliser toute l'eau disponible dans la partie inférieure de la zone racinaire. La croissance racinaire tardive pourrait être stimulée en situation de déficit hydrique (Winkel et Do, 1992).

La germination du mil est très rapide (la petite taille du grain facilitant l'absorption d'eau) mais les réserves limitées de la plantule la rendent complètement tributaire de la photosynthèse dès le 6^{ème} jour. La **vigueur précoce du mil**, c'est-à-dire son développement rapide, peut avoir des effets opposés selon la distribution des pluies au cours du cycle. D'une part, une culture couvrant rapidement le sol va limiter les pertes en eau par évaporation au bénéfice de la transpiration et intercepter rapidement le maximum de lumière. D'autre part, une surface foliaire très développée va également accélérer la consommation des ressources en eau du sol et, en cas de sécheresse, la plante risque de connaître un déficit hydrique sévère avant la maturation complète des grains (sauf si la bonne croissance initiale a permis de constituer des réserves carbonées mobilisables). La survie et le maintien du rendement dépendront alors de la croissance des racines pendant la phase d'installation de la culture (Winkel et Do, 1992).

c) L'évitement de la sécheresse

Les mécanismes d'évitement de la sécheresse mis en place par le mil concernent (de Rouw et Winkel, 1998) (Winkel et Do, 1992) :

- La **synchronisation du cycle végétatif** à des périodes de hautes probabilités de conditions de croissance satisfaisantes. Le développement de la tige principale coïncide avec la période de plus haute probabilité de pluviométrie élevée.
- La **plasticité du développement** ou variation de la durée d'une phase de croissance en fonction de l'importance des déficits en eau. Le développement hâtif et asynchrone des panicules et fleurs permet d'étaler la floraison sur une longue période, en maintenant le rendement potentiel même si la tige principale est endommagée.

- La **plasticité de la croissance**. Quand l'eau est disponible et les nutriments non limitants, les talles peuvent représenter jusqu'à 70 % de l'appareil végétatif de la plante et constituent une « banque » de matière sèche et d'éléments nutritifs qui peut servir de tampon face aux fluctuations de l'environnement. **La perte en poids des grains sur les tiges principales causée par un déficit hydrique peut être partiellement ou entièrement compensée par l'accroissement de la production des talles** (par la multiplication des talles fertiles et l'augmentation du nombre de grains par épi).
- La **remobilisation des assimilats vers le grain**. Une partie importante de la croissance des grains serait due à l'activité photosynthétique des feuilles en période postflorale. En absence de contrainte hydrique, les substances carbonées produites avant la floraison ne participent pas au remplissage des grains. L'émergence des épis stimule fortement les transferts carbonés à partir des feuilles. On admet que la contrainte hydrique réduit les capacités de synthèse des feuilles, ainsi que les transferts d'assimilats. Si elle a lieu durant la phase de remplissage des grains, elle peut donc affecter directement la production finale. Le mil présente néanmoins une grande stabilité de rendement face au déficit en eau. Les hypothèses avancées font état d'une remobilisation vers les grains des assimilats de la période préflorale et une redistribution des composants minéraux et glucidiques par régression de talles au profit des talles fructifères. Cette remobilisation aurait pour effet d'améliorer l'efficacité de l'eau en termes de production de grain. C'est ainsi **que des phénomènes compensatoires pourraient également avoir lieu entre le nombre et le poids des grains**. Ces composantes sont déterminées à des phases différentes du cycle et donc dans des conditions parfois contrastées mais on note que le poids suffit rarement à compenser la baisse du nombre de grain.
- Le **maintien de la surface foliaire verte**. Ce maintien favorise la stabilisation de la production en permettant une reprise rapide et complète de l'activité photosynthétique dès que le stress est levé. Cette stratégie est adaptée à une contrainte hydrique intermittente mais contribue à épuiser les réserves en eau du sol en cas de contrainte prolongée.
- La **réduction de la surface de feuilles vertes**. Une sécheresse postflorale (déficit de 7 jours) peut provoquer une réduction de 50 % de la surface foliaire verte. Une sénescence foliaire rapide permet dans ce cas la réduction de la transpiration.

7.2. Impact des pratiques culturales

Le développement asynchrone des talles reste le principal facteur de maintien du rendement en limitant la baisse du nombre total de grains. Notons que la **densité** de semis, les **nutriments** présents (la fertilisation) et la **pluviométrie** (timing et la durée) vont fixer les limites du nombre de talles fertiles, de la période de floraison et donc de la réponse « plastique » du mil. L'application de N, particulièrement en combinaison avec P, stimule le

tallage, la floraison hâtive et la fertilité des talles. Le tallage détermine aussi la surface foliaire et la consommation en eau de la plante (Winkel et Do, 1992 ; Winkel et al., 1997).

La **variation spatiale de la croissance** ou micro-variabilité est également importante. Cette variation dépend de l'hétérogénéité physique et chimique du sol ainsi que des pratiques culturales. Les agriculteurs sont souvent contraints de ressemer les poquets manquants et peuvent s'ajuster aux conditions environnementales par les pratiques du démariage et du sarclage (de Rouw, 2003). C'est ainsi que les agriculteurs produisent des poquets d'âges différents et des plants d'âges différents au sein d'un même poquet (l'émergence au sein d'un poquet peut être déphasée car les semences sont enterrées à des profondeurs différentes) (de Rouw et Winkel, 1998). Au niveau de l'agro-système, la **diversité génotypique** des variétés locales et l'hétérogénéité environnementale donnent des variabilités de croissance et de développement des plantes qui permettent une dispersion des risques en cas de sécheresse (Winkel et al., 1997).

La meilleure stratégie pour réduire le risque de perte de rendement causé par une sécheresse est d'étaler les stades sensibles dans le développement de la culture sur la plus longue période possible (de Rouw et Winkel, 1998).

7.3. Effet d'une sécheresse à différents moments du cycle

D'après Winkel et al. (1997), les risques de sécheresse doivent être classés en deux types. Les **sécheresses de début ou de fin de saison culturale** sont fréquentes et souvent longues et sont combattues par des semis successifs ou par le choix de cultivars à cycle court tolérants aux déficits hydriques post-floraison. Elles sont généralement peu dommageables quand aux pertes en rendement en grain (de Rouw, 2003). Les **sécheresses intermédiaires** (plus courtes, ± 10 jours et plus imprévisibles) ont lieu durant les phases d'initiation des panicules, de la floraison ou de la pollinisation et peuvent endommager des fleurs ou des panicules entières.

Dans une étude sur les **effets d'une sécheresse de préfloraison**, de Rouw et Winkel (1998) remarquent qu'il existe des sous-populations de plants fleurissant tôt, de floraison intermédiaire ou de floraison tardive et que les talles fertiles sont concentrés dans le groupe des plants fleurissant tôt. Ce groupe est capable de sécuriser une partie de la production en retardant (de 13-18 jours) le développement de talles fertiles après la période de stress. Les plants de floraison tardive sont souvent « unitiges » ou moins tallés. Le développement de talles fertiles est diminué par un sol pauvre et une courte durée de la saison des pluies. La composante de rendement responsable de la réduction de rendement est principalement le **nombre de grains par panicule**, tandis que la composante la moins affectée par la sécheresse est le **poids moyen d'un grain** et le **nombre de poquets à l'hectare**. De Rouw et Winkel (1998) concluent que l'initiation florale et la floraison sont beaucoup plus perturbées par une sécheresse de préfloraison que le remplissage des grains et la survie des poquets.

Dans une autre étude, les mêmes auteurs observent un délai de floraison dû à la sécheresse préflorale pour les plants n'ayant pas reçu de N. L'application de N permet de

général, au plus tôt a lieu la floraison, au plus de panicules peuvent être produits (sauf si la sécheresse affecte l'initiation des panicules). La proportion de panicules fleurissant tôt reflète l'abondance des premières pluies.

7.4. Décomposition du rendement en grain

L'analyse des composantes du rendement permet de détecter dans la saison de culture les périodes favorables ou défavorables aux différents stades de croissance. Ces stades de développement correspondent à ceux des variétés à cycle court (environ 100 jours), les variétés à cycle long semées dans la région peuvent avoir des cycles végétatifs jusqu'à 120 jours et dans ce cas c'est la période du tallage qui s'allonge (de Rouw et Rajot, 2004).

Le rendement en grain reflète la combinaison de la densité de semis des plants et des composants de rendement :

$$Y = S * N_r * N_p * W_g \quad (1)$$

où Y est le rendement en grain par parcelle (kg ha⁻¹)

S est la densité du semis (poquets ha⁻¹)

N_r est le taux de poquets survivants (à la récolte) (% poquets semés)

N_p est le nombre de talles portant des panicules par poquet (panicules poquets⁻¹)

W_g est le poids de grains par panicule (kg panicule⁻¹)

Les conditions de croissance sont d'abord reflétées par le nombre de poquets survivants (N_r) (fixé entre 0-15 JAS) qui reflète les conditions d'installation et d'émergence de la plante ou **phase végétative** (0-50 JAS). Le nombre de panicules (N_p) est déterminé par les conditions de croissance pendant le tallage et l'initiation de la panicule (15-50 JAS). Le nombre de grains par panicule reflète les conditions ayant lieu lors du développement de la panicule et de la floraison, c'est-à-dire lors de la **phase reproductrice** (50-75 JAS) tandis que le poids moyen d'un grain est déterminé par les conditions de croissance pendant la **phase générative** de remplissage des grains (de la fécondation à la maturité : 75-100 JAS). Le poids des grains par panicule (W_g) reflète donc les deux dernières phases (de Rouw et Rajot, 2004).

1. Site de l'expérience et choix des champs expérimentaux

Le site d'étude, situé dans la région du Fakara, englobe 3 villages principaux : Banizoumbou (13°31'N, 2°39'E), Bagoua et Kodey (Figure 8). Ce site fut choisi à cause de l'abondance de données bio-physiques et socio-économiques déjà disponibles dans une base de données spatialement géoréférencée. Un champ a été choisi à proximité de chacun de ces villages.

Les champs ont été sélectionnés de façon à ce que cinq types de pratiques de gestion de la fertilité organique (niveaux de fumure organique) soient présents dans le même champ en début d'essai. D'autre part, les champs sont suffisamment éloignés du centre du village pour que le risque que les enfants du village interfèrent avec le déroulement de l'expérience soit minimisé. Enfin, plusieurs chercheurs avaient déjà travaillé avec les agriculteurs propriétaires des champs dans un essai préliminaire et ceux-ci étaient déjà habitués à suivre les obligations inhérentes à un travail scientifique.

L'essai fut mis en place durant la saison des pluies 2003 pour une durée de trois ans.

2. Dispositif expérimental

2.1. Les pratiques de gestion de la fertilité organique

Chacun des champs a été divisé en strates correspondant à des **pratiques de gestion de la fertilité organique** différentes. Ces pratiques sont le parcase (PA) et le transport de fumier (FT), ainsi que l'effet résiduel du parcase un an et deux ans après application. Une strate non traitée par application de fumier (NF) est également ajoutée. Les chiffres qui suivent indiquent l'année d'application de la technique (2001, 2002, 2003, 2004 ou 2005). Une strate concernant l'effet résiduel du fumier transporté a été ajoutée chaque année.

En 2003, les champs sont divisés en **5 strates**: PA03, PA02, PA01, FT03 et NF. Les strates PA03 et FT03 représentent le parcase et le fumier transporté de l'année tandis que les strates PA02 et PA01 représentent les strates où le parcase a été effectué un an et deux auparavant (Figure 18). En 2004, **6 strates** sont délimitées par champ (PA04, PA03, PA02, FT04, FT03 et NF) et **7 strates** en 2005 (PA05, PA04, PA03, FT05, FT04, FT03 et NF).

Chacune des strates a été divisée en parcelles élémentaires selon un design multi-factoriel comprenant 3 niveaux de fertilisation minérale, 3 variétés de mil et 3 répétitions (Figure 19). Le schéma du dispositif expérimental est repris en Annexe 2.

Le parcase de l'année est réalisé durant la saison sèche (janvier, février, mars) par les fermiers. L'application de fumier transporté a lieu en fin de saison sèche (mai), au moment du

piquetage des parcelles. Le fumier provient du village, il contient des déchets ménagers, des résidus végétaux et des bouses de petits ruminants. La composition du fumier et la quantité appliquée diffèrent selon les champs. Le parage et l'épandage de fumier transportés ont lieu chaque année dans les deux blocs délimités à cet effet. En règle générale, toutes les opérations culturales sont suivies par des techniciens de l'ICRISAT, aidés par des manœuvres locaux engagés pour les travaux lourds.

Suite à la grande variabilité des quantités appliquées entre sites et années, l'application de fumier transporté a été contrôlée en 2005 à Kodey à 180 kg par parcelle, c'est-à-dire à 18000 kg ha⁻¹. Le parage en 2005 à Kodey a également été contrôlé par un technicien de l'ICRISAT et appliqué en février 2005. Pour obtenir le même taux d'application que celui du fumier transporté, 8 vaches ont été parquées par parcelle pendant 1 semaine (selon une norme calculée par International Livestock Research Institute (ILRI), Ayantunde et al., 2001). A Banizoumbou et à Bagoua, le parage et l'application de fumier ont été réalisés par les paysans, les apports étaient donc nettement moins uniformes spatialement.



Figure 18. Dispositif expérimental superposé à une photo aérienne du site de Kodey, le 17 septembre 2003. Chacun des 5 blocs (strates) représente une pratique de gestion de fertilité organique différente. (ICRISAT, 2003)

9 combinaisons variété X engrais minéral									parcelle élémentaire
101	102	103	104	105	106	107	108	109	3 répétitions
209	208	207	206	205	204	203	202	201	
301	302	303	304	305	306	307	308	309	

Figure 19. Représentation schématique d'une strate de pratique de gestion de la fertilité

Différentes cartes de la zone d'étude existantes ont été combinées à des mesures effectuées par GPS pour localiser et cartographier précisément les parcelles d'essai en 2003. Les coordonnées des nouvelles strates ont été reprises en 2005 pour être ajoutées à la base de données existante.

Un *GPS Pathfinder Trimble TDC1 (modèle 3300-CNCHOPE-007)* a été utilisé pour localiser les blocs PA04, PA05, FT04 et FT05. Ce GPS différentiel fournit des mesures dont l'erreur est inférieure à 1 m lorsque les mesures sont corrigées par rapport à l'antenne satellite fixe installée au centre ICRISAT de Sadoré.

Néanmoins, nous n'avons pas pu encoder les données : le câble permettant la transmission des données vers un ordinateur est déficient depuis avril 2005. Nous ne possédons donc que les cartes de l'essai en 2003.

2.2. Les niveaux de fertilisation minérale

L'essai compare trois niveaux de fertilisation minérale : l'application de DAP (phosphate diammonique 18-46-0), l'application de DAP couplée à celle d'urée et un niveau « témoin », sans fertilisation minérale. La raison pour laquelle on a choisi de travailler avec du DAP au lieu du plus classique NPK 15-15-15 est que le DAP est plus concentré en N et P et requiert donc une application en quantité moindre (2 g par poquet) que le NPK (6 g par poquet) pour une même dose de P appliqué.

L'application de DAP est effectuée lors du semis. La technique consiste à placer 2 g de DAP par poquet. Cette application est effectuée par la technique « des trois doigts » : une pincée permet d'appliquer approximativement la quantité voulue. L'application de 2 g par poquet correspond à un taux de 20 kg DAP ha⁻¹, c'est-à-dire à **4 kg P ha⁻¹** et à **3,6 kg N ha⁻¹** entièrement sous forme de NH₄ (Buerkert et al., 2001).

L'application d'urée doit s'effectuer après un évènement pluvieux pour garantir l'utilisation de l'azote par les plants en limitant la volatilisation ammoniacale (très importante sur les sols secs et chauds) et éviter les brûlures chimiques. Cette application s'effectue au moment de la montaison des plants de mil, environ au même moment que le second sarclage (Tableau 4 p.78). Un gramme d'urée chimique est appliqué par poquet, ce qui correspond à une application de **4,6 kg N ha⁻¹**. On choisit d'appliquer l'urée bien après le DAP pour éviter tout gaspillage d'éléments nutritifs lorsque les plantules sont jeunes et pour que le mil bénéficie d'un second apport fertilisant juste avant l'initiation des panicules.

2.3. Les variétés

L'essai compare la variété locale et les variétés améliorées ICMV IS 89305 et Zatif.

La variété locale résulte de la sélection opérée par les paysans de la région. Cette variété est donc bien adaptée aux conditions régionales et elle présente un cycle de croissance d'environ 100 jours.

La variété ICMV IS 89305 est une variété améliorée obtenue par sélection récurrente à partir de croisements entre les variétés $\frac{3}{4}$ HK B-78, Souna-3 et CIVT. Les variétés améliorées sont plus homogènes génétiquement que les variétés locales. La variété de mil ICMV IS 89305 fleurit à 70 JAS et montre un cycle de 95 à 100 jours. Elle est résistante au mildiou et est protégée contre les insectes foreurs de tige. Cette variété possède un rendement potentiel en grain de 2000 kg ha⁻¹. L'indice de récolte vaut 27 % en conditions optimales et le poids moyen de 1000 grains est de 10 g (ROCAFREMI, 2002).

La variété Zatib a été obtenue par sélection des cultivars locaux Zanfarwa et Tchibijini. Il s'agit d'une variété légèrement plus précoce que la précédente : elle fleurit à 60 JAS et présente un cycle végétatif de 95 jours. Cette variété de mil est reconnaissable à ses plants touffus et plus petits que les deux autres variétés, ainsi qu'à ses feuilles glabres. Elle est résistante au mildiou et est protégée contre la chenille de l'épi. Le rendement potentiel en grain varie entre 1500 et 2000 kg ha⁻¹. L'indice de récolte vaut 27 % en conditions optimales et le poids moyen de 1000 grains est de 10,5 g (ROCAFREMI, 2002).

Les fiches techniques des variétés améliorées sont présentées en Annexe 1. Chaque variété sera semée sur les parcelles individuelles correspondantes, conformément au schéma en Annexe 2.

2.4. La parcelle élémentaire et la disposition de l'essai sur les champs

Chaque parcelle élémentaire mesure 100 m² et est caractérisée par son appartenance à un site, une strate de fumure organique, un niveau de fertilisation minérale, une variété de mil et une répétition. La densité de semis est de 10 000 poquets ha⁻¹, c'est-à-dire 121 poquets par parcelle (poquets séparés de 1 m). Les parcelles sont séparées de 1 m, les strates de 2 m ou plus. Chaque bloc mesure 32 x 98 m = 3136 m² et donc la superficie occupée par l'essai sur un site couvre au minimum 3136 m² x 5 = 1,56 ha (en 2003).

3. Dispositif de mesures et analyse de données

3.1. Pluviométrie

Un pluviomètre a été installé sur chacun des 3 sites. Après chaque pluie, un technicien de l'ICRISAT a relevé le niveau d'eau dans le pluviomètre (Figure 20).



Figure 20. Pluviomètre installé à Bagoua

3.2. Profils de teneur en eau

Depuis 2004, des tubes en aluminium (48 mm de diamètre interne) ont été installés au centre de chaque parcelle. Des mesures d'humidité du sol à différentes profondeurs (tous les 15 cm jusqu'à 210 cm) sont effectuées grâce à des sondes à neutrons *Didcot Instruments (type I H III)* en 2004 et *503-DR Hydroprobe* en 2005 (Figure 21 et Figure 22).

Les mesures des profils de teneur en eau sont prises environ une fois par semaine, sur sol réessuyé en cas de pluie. Pour des raisons logistiques (temps, matériel et charge de travail), ces mesures n'ont pas été effectuées sur les parcelles semées avec la variété ICMV IS 89305. Ces mesures ont été réalisées en 2004 sur les strates de fertilité NF, FT04, PA04, PA03 et PA02 tandis qu'en 2005 ce sont les strates NF, FT05, PA05, PA04 et PA03 qui sont concernées.



Figure 21. Sonde à neutrons 503 DR Hydroprobe utilisée en 2005

a) Principe de fonctionnement d'une sonde à neutrons

Les humidimètres neutroniques (ou sondes à neutrons) mesurent l'humidité volumique du sol (θ) en utilisant la propriété qu'ont les neutrons rapides (énergie = 2 MeV) à être ralentis préférentiellement par les atomes d'hydrogène, qui dans le sol sont majoritairement inclus dans les molécules d'eau.

La mesure est réalisée par l'introduction de la sonde dans un tube en alliage d'aluminium enfoncé verticalement dans le sol où il est laissé en permanence. La sonde est descendue dans le tube d'accès et la source de neutrons rapides (Radium-Béryllium ou Américium-Béryllium) accompagnée du détecteur de neutrons lents (de basse énergie < 0,025 eV) est amenée à la profondeur désirée. Les neutrons rapides émis entrent en collision avec les noyaux d'hydrogène qui ont une masse pratiquement identique à la leur et perdent ainsi progressivement leur énergie cinétique lors de chocs élastiques. Les neutrons ralentis se dispersent au hasard et un "nuage" stable de neutrons lents se forme rapidement autour de la source. Il présente une forme sensiblement sphérique avec un diamètre d'autant plus grand que le sol est plus sec (diamètre de l'ordre de 30 cm sur sol sec). Le nombre de neutrons lents par unité de volume est proportionnel à la quantité d'eau dans le sol traversé par le tube. Du fait que le détecteur de neutrons lents se situe dans le volume de ce nuage, le comptage (cpm ou cps) est proportionnel à θ pour ce même volume de sol. La mesure consiste donc à compter pendant un temps déterminé le nombre de neutrons lents qui reviennent vers la sonde (Bacchi et al., 2000).

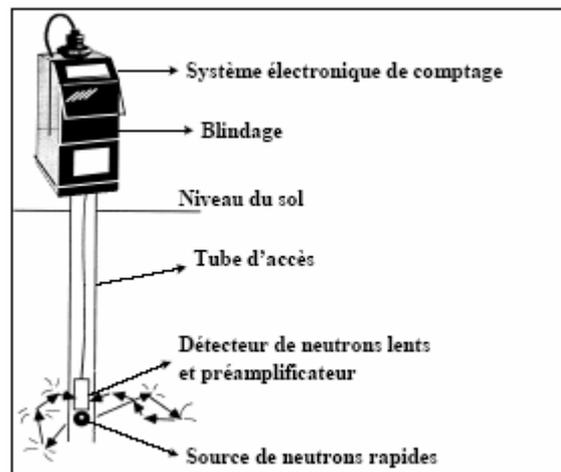


Figure 22. Schéma d'une sonde à neutrons 503 DR Hydroprobe (Bacchi et al., 2000)

b) Calibration et vérification des données

La correspondance entre θ et le comptage résulte d'un étalonnage à partir d'échantillons de sol prélevés dans le volume occupé par le nuage de neutrons et pour lesquels sont effectuées des mesures de θ par la méthode gravimétrique. Cet étalonnage fut effectué par des techniciens de l'ICRISAT chaque année. Un comptage standard (SC) fut

réalisé chaque jour de prise de mesures (matin et soir) en plaçant la sonde à saturation dans un fût d'eau. θ est estimé à chaque profondeur par la formule suivante :

$$\theta = \text{intercept} + \text{pente} * \frac{\text{comptage}}{SC} \quad (2)$$

Bacchi et al. (2000) notent qu'en matière de calibration de sonde à neutrons, l'échantillonnage est le principal problème. En effet, en théorie, le même volume de sol doit être exposé à la sonde et servir à la mesure gravimétrique. Dans la pratique, ceci est difficilement réalisable dans la mesure où le volume vu par la sonde n'est pas très bien défini et qu'il est, en général, largement supérieur à celui des échantillons de sols prélevés. La certitude que les volumes échantillonnés par les deux approches (neutronique et gravimétrique) soient identiques ne peut jamais être acquise.

Les profils de teneur en eau ont été visionnés graphiquement au moyen d'une macro écrite en Visual Basic dans Excel par Biolders (1997) afin de corriger les erreurs d'encodage (graphes non présentés).

3.3. Calcul de l'eau utile pour les plantes et bilan hydrique par parcelle

L'eau utile pour les plantes (mm) (EU) a été estimée selon l'équation suivante :

$$EU_j \text{ (mm)} = \sum_{i=1}^n (\theta_{ij} - \theta_{c_{ij}}) \Delta_{zi} \text{ pour tout } i \text{ tel que } \theta_{ij} \geq \theta_{c_{ij}} \quad (3)$$

où les indices i et j représentent les couches de sol et le temps ;
 θ_i est la teneur en eau mesurée dans la couche i ($\text{m}^3 \text{ m}^{-3}$);
 θ_{c_i} est la teneur en eau critique dans la couche i ($\text{m}^3 \text{ m}^{-3}$);
 Δ_{zi} représente l'épaisseur de chaque couche (mm).

La teneur en eau a été interpolée linéairement entre deux profondeurs. La teneur en eau critique (θ_{c_i}) est définie comme la teneur en eau à laquelle le mil commence à subir un stress hydrique. Celle-ci est plus élevée que la teneur au point de flétrissement permanent (θ_{FPi}). Les θ_{FPi} ont été fixées à 0,022 entre 0 et 15 cm, à 0,026 entre 15 et 30 cm, à 0,03 entre 30 et 45 cm, à 0,034 entre 45 et 60 cm, à 0,038 entre 60 et 75 cm et à 0,031 à partir de 75 cm de profondeur, avec une évolution linéaire de θ_{FP} dans les couches intermédiaires. Les θ_{c_i} ont été fixés à $\theta_{FPi} + 0,03$ dans les premiers 60 cm de sol et à $\theta_{FPi} + 0,04$ ensuite (Rockström et de Rouw, 1997, cités par Biolders et al., 2004). Nous avons intégré EU_j jusqu'à une profondeur maximale d'enracinement fixée à 1,50 m. EU a été calculé pour cette même profondeur quelque soit la strate de fertilité dans un site. Il estime donc les variations d'eau utile induites par le climat plutôt que par le sol et/ou la strate de fertilité.

3.4. Evaluation des apports de matière organique

L'évaluation des apports de matière organique au sol est mesurée à **partir de 2004** par la méthode du placeau. Il s'agit d'échantillonner les strates de pratique de fertilité en plaçant aléatoirement 4 à 5 fois par parcelle élémentaire un placeau de 0,5 m x 0,5 m (cadre en bois). La matière organique est prélevée, séparée en matière organique végétale et fécale (MOV et MOF) et le poids humide de chacune des fractions est pesé sur le terrain. Ensuite, un échantillon de chaque fraction est prélevé et pesé. Après un passage à l'étuve (60°C pendant 48 h au laboratoire de l'ICRISAT à Sadoré), les échantillons serviront à déterminer le poids sec de matière organique présente dans chaque position du placeau.

Nous effectuons les moyennes de poids sec de MOF et MOV par parcelle (sur les différents emplacement du placeau) et calculons ensuite la moyenne de MOF et MOV sur une même strate. Cette façon de procéder permet de tenir compte du fait que le nombre de placeau par parcelle est variable (4 à 5) et que le nombre de parcelles dans lesquels on effectue l'analyse est variable en fonction des strates et des sites.

Il est important de remarquer que par « apport de matière organique » on signifie « résidus résultants d'apports de matière organique fraîche (d'origine végétale ou fécale, résidus de culture ou fumier) mesurés à la surface du sol ». Il ne s'agit donc pas des apports bruts en fumier par exemple, car les mesures ont été prises après la date d'application (et il peut y avoir eu une disparition de matière suite à des processus de minéralisation, d'humification ou déplacement par les termites).

En 2004, l'évaluation des apports a eu lieu à Banizoumbou le 11 et 12 mai (1,5 mois avant le semis) ; à Bagoua le 13 mai (une semaine avant semis dans les strates FT04, PA02 et NF) et le 2 juin (après semis dans les strates FT03, PA03, PA04) ; à Kodey le 29 avril (un mois avant semis dans la strate PA04) et le 2 et 3 juin à Kodey (au moment du semis dans les autres strates). **En 2005**, les mesures à la méthode du placeau ont été effectuées le 13 et 14 mai à Banizoumbou, le 18 mai à Bagoua et le 19 mai à Kodey, c'est-à-dire environ 15 à 20 jours avant le semis dans toutes les strates.

3.5. Développement de la culture

Différentes mesures phénologiques sont effectuées régulièrement par un technicien de l'ICRISAT. La division du développement du mil en 10 stades phénologiques permet l'enregistrement et la comparaison de l'évolution des plants de mil. Les descriptions se réfèrent au développement de la tige principale uniquement. Les stades 0 à 2 font partie de la phase végétative, les stades 3 à 6 de la phase reproductive et les trois derniers stades concernent la phase de remplissage des grains (Maiti et Bidinger, 1981).

Etant donné qu'il y a 121 poquets par parcelle et plusieurs tiges principales par poquet, il fut choisi de noter, pour chaque date d'observation, le stade de la tige principale ayant le stade phénologique le plus avancé. Par manque de temps, ces mesures n'ont été réalisées dans tous les sites qu'en 2005.

Les dates correspondantes aux stades de développement suivants sont notées (en DOY, day of the year, jour de l'année) au niveau de chaque parcelle :

- date de l'émergence : stade 0

Ce stade débute par l'émergence du coléoptile à la surface du sol. Le temps requis avant l'émergence de la plantule dépend de la profondeur du semis, de l'humidité du sol et de la température. L'émergence se produit 2 à 3 jours après le semis.

- date de l'émergence du 1^{er} talle : stade 3

Ce stade concerne l'initiation de la panicule. Les primordias foliaires cèdent la place aux primordias de l'appareil reproductif. L'élongation du dôme apical débute. Les premiers entre nœuds s'allongent et plusieurs talles apparaissent. Ces talles suivent les mêmes stades de développement que la tige principale avec un décalage dans le temps.

- date d'apparition de la feuille du panicule : stade 4

Le limbe de la dernière feuille est visible. Cette dernière se distingue des autres feuilles car elle ne possède plus de nouvelles feuilles émergeant en son centre. Les entre-nœuds continuent à s'allonger. Les méristèmes de la panicule se différencient, le processus commençant à la base de celle-ci et progressant vers le haut. La panicule est enfermée dans la gaine formée par les dernières feuilles et elle est poussée vers le haut par l'élongation de la tige via les entre-nœuds.

- date d'apparition de la 1^{ère} panicule : stade 5

Le développement de la panicule est presque complet. Celle-ci croît en longueur et en largeur jusqu'à émerger de la gaine de la dernière feuille. Le pédoncule (dernier entre-nœud) s'allonge en même temps ; c'est l'épiaison.

- date de début de la floraison

- date de 50 % de floraison : stade 6

Les stigmates fleurissent les premiers (protogynie), en commençant quelques centimètres sous la pointe et en se propageant des deux côtés. Le stade 50 % de floraison est atteint lorsque les stigmates apparaissent au niveau du milieu de la panicule. En quelques jours, les stigmates ont tous émergé et les premières anthères apparaissent. Le développement de toutes les anthères nécessite jusqu'à 5-6 jours. Différentes panicules d'une même plante peuvent fleurir simultanément ou séquentiellement.

- date de la maturité : stade 9

L'endosperme passe par une phase de maturation laiteuse, une phase de maturation cireuse avant d'atteindre la maturation physiologique. Celle-ci est marquée par l'apparition d'un point (une petite ligne) noire dans la région du hile de la graine. Cette étape coïncide avec la fin du remplissage des grains et marque donc la fin de leur croissance. Les grains ont alors atteint leur poids sec maximum et l'endosperme est devenu dur.

Lors du démariage, on note également par parcelle le nombre de poquets et le nombre de plants par poquets. Ce dernier permet de calculer le taux de survie des poquets au démariage (%). Notons que ce taux est calculé sur l'entièreté de la parcelle tandis que la plupart des mesures de rendement seront calculées sur la superficie intérieure de la parcelle (sans tenir compte des rangées situées en bordure).

3.6. Mesures de rendement à la récolte

Différentes variables sont mesurées à l'échelle de chaque parcelle au moment de la récolte. Nous utilisons la terminologie « épi », plutôt que « faux-épi » pour désigner la panicule.

Le nombre de poquets récoltés sur la superficie intérieure de la parcelle, sans compter les poquets de bordure, est au maximum égal à 81 (Figure 24). Ce nombre permet de déterminer le taux de survie des poquets à la récolte (%). Les poquets végétatifs et non matures ne sont pas comptabilisés dans les poquets récoltés. Il s'agit respectivement des poquets ne présentant pas d'épis et des poquets à épis ne portant pas de grains.

Le nombre de talles par poquet est calculé en comptant le nombre de talles et le nombre de poquets sur les diagonales de chaque parcelle. Le nombre d'épis récoltés est le nombre total d'épis récoltés par parcelle. Divisé par le nombre de poquets récoltés, il donne le nombre d'épis par poquet, dont la valeur est généralement similaire mais légèrement inférieure au nombre de talles par poquet.

Le poids frais des feuilles et tiges liées en gerbe est mesuré sur le terrain à l'aide de balances mécaniques de 50 kg (graduations à 200 g) fixées sur des trépieds. Un sous-échantillon de la gerbe est également pesé à l'aide d'une balance plus petite (5 ou 10 kg, graduations à 20 g). Le poids sec de l'échantillon de feuilles et tiges est mesuré après que celui-ci ait été laissé à sécher plusieurs jours au soleil. Il servira à déterminer le poids sec des feuilles et des tiges.

Les épis sont liés en bottes et le poids frais des épis est mesuré de la même façon que pour les gerbes de feuilles et tiges. Un sous-échantillon est également pesé. Le poids sec de l'échantillon d'épis est mesuré après que celui-ci ait été laissé à sécher au soleil. Il servira à déterminer le poids sec total des épis de la parcelle. Les graines contenues dans l'échantillon d'épis sont séparées de la panicule et pesées. Ce poids des graines de l'échantillon d'épis, divisé par le nombre d'épis, permettra de calculer le poids moyen des grains par épi.

Les mesures de poids sec, sachant que l'aire de récolte d'une parcelle est de 81 m², permettent le calcul des différents rendements.

Le rendement en paille Y_p est calculé comme le quotient du poids sec (Ps_p) et du poids frais (Pf_p) de l'échantillon de feuilles et tiges, rapporté au poids frais total (PF_{tot_p}) de la gerbe de feuilles et tiges par parcelle.

$$Y_p (kg / ha) = \frac{Ps_p (g)}{Pf_p (g)} \cdot PF_{tot_p} (g) \cdot \frac{10}{81} \quad (4)$$

Le rendement en botte d'épis Y_b est évalué comme le quotient du poids sec (Ps_b) et du poids frais (Pf_b) de l'échantillon d'épis, rapporté au poids frais total des épis par parcelle (PF_{tot_b}).

$$Y_b (kg / ha) = \frac{Ps_b (g)}{Pf_b (g)} \cdot PF_{tot_b} (g) \cdot \frac{10}{81} \quad (5)$$

Le rendement en grain Y_g est calculé comme le quotient du poids des grains (Ps_g) de l'échantillon d'épis et du poids frais de l'échantillon d'épis (Pf_b), rapporté au poids frais total des épis par parcelle (PF_{tot_b}).

$$Y_g (kg / ha) = \frac{Ps_g (g)}{Pf_b (g)} \cdot PF_{tot_b} (g) \cdot \frac{10}{81} \quad (6)$$

Le rendement en biomasse est la somme des rendements en paille et en bottes. L'indice de récolte est le quotient du rendement en grain sur le rendement en biomasse exprimé en %.

Vu le nombre important de mesures effectuées, des erreurs de mesures de poids (dues à la précision des balances et à la lecture de la mesure par les techniciens) ainsi que des erreurs de comptage (dues au travail répétitif dans chaque parcelle) ont pu altérer les valeurs des variables réponse traitées dans cette analyse.

3.7. Evaluation des contraintes biotiques

A la récolte, on évalue l'état sanitaire de chaque parcelle. Le nombre de poquets atteints par le **mildiou** et le nombre de plants de **shibra** (*Pennisetum stenostachyum*) sont comptés par parcelle. La proportion de **Striga hermonthica** dans chaque parcelle est évaluée sur base de l'échelle qualitative suivante : 0 = nulle, 1 = faible, 2 = moyenne et 3 = élevée.

Différents insectes deviennent nuisibles pour la culture de mil s'ils sont présents en grande quantité. Les dégâts causés par les insectes n'ont pas été importants. Ils n'ont donc pas fait l'objet d'observations et les pertes de récolte n'ont pas été évaluées. Nous signalons toutefois la présence de fourmis, de termites et de punaises sur les champs de l'essai.

Les fourmis sont présentes dans tous les sites, il existe en moyenne une fourmilière par strate de fertilité organique. Les poquets situés sur les fourmilières se développent mal car leur système racinaire est attaqué.

Les termites sont également présentes dans tous les sites. La présence de termites influence la disparition de la matière organique fraîche apportée au sol. A Bagoua en 2004, les mesures faibles de MOF et MOV au sol mesurées par la méthode du plateau sont probablement dues à l'activité des termites. Plus la durée laissée entre la fin du parage ou l'application de fumier transporté et les mesures au plateau est longue, plus les termites sont susceptibles d'avoir prélevé une partie de la matière organique apportée au sol. Dans ce contexte, une mesure de la disparition de MO en continu a été entreprise en 2005 (pesée toutes les deux semaines de bouses contenues dans des cages grillagées accessibles aux termites) mais ces données ne sont pas traitées dans cette étude. En 2005, les termites ont été particulièrement actives sur le site de Kodey.

Les punaises se développent sur les épis en cas de sécheresse. A Kodey, une sécheresse de 2-3 semaines en août 2005 les a empêchées de tomber au sol et elles ont attaqué les grains.

Signalons que des manœuvres ont été engagés en fin de cycle de croissance pour chasser les oiseaux et éviter de trop importantes pertes en grain, surtout chez les variétés à cycle plus court que la variété locale.

3.8. Propriétés physiques et chimiques du sol

a) **Analyses chimiques des sols**

Des échantillons de sol ont été prélevés avant le début de l'essai, le 2 juin 2003. Les échantillons ont été prélevés à 3 profondeurs différentes (0-10 cm, 10-20 cm et 20-40 cm) dans chaque répétition au sein de chaque strate de fertilité. 9 échantillons de sol sont donc disponibles par strate de fertilité organique. Ils ont été remis au laboratoire de l'ICRISAT à Sadoré pour analyse chimique des paramètres suivants : pH KCl (1 M), pH H₂O (1:2,5), phosphore disponible (méthode Bray 1), carbone organique (méthode Walkley et Black), azote total (méthode Kjeldahl), capacité d'échange cationique (méthode Argent Thiourée), H⁺ et Al³⁺ (KCl 1 M). Les protocoles expérimentaux sont repris en Annexe 3.

Chaque année, des échantillons de sols sont pris dans les nouvelles strates. En 2005, deux prélèvements par parcelle (sur la diagonale) ont été effectués dans les strates FT05 et PA05, à 0-10 cm, 10-20 cm et 20-40 cm. Ces deux échantillons sont mélangés et un sous-échantillon est prélevé (échantillons composites). Au total, 3 échantillons sont donc disponibles pour chaque parcelle. Ces échantillons sont prélevés au semis, pendant la période de croissance et après la récolte, ils sont stockés à l'ICRISAT en vue d'une analyse texturale et chimique éventuelle.

b) **Analyse texturale des sols**

Une analyse texturale a également été effectuée avant le début de l'essai sur des échantillons récoltés à différentes profondeurs sur chaque strate et site (0-10 cm, 10-20 cm, 20-30 cm, 30-60 cm, 60-90 cm, 90-120 cm, 120-150 cm, 150-180 cm, 180-210 cm). L'analyse a été effectuée par le laboratoire de l'ICRISAT et porte sur les 5 classes texturales suivantes : sable fin, sable grossier, limon fin, limon grossier et argile. La conductivité hydraulique à saturation (K_o) a été calculée sur base de l'équation suivante par Manyame en 2003 :

$$K_o \text{ (cm h}^{-1}\text{)} = 28,42 - [1,534 * (\text{argile} + \text{limon fin})] \quad (7)$$

3.9. Analyse statistique

a) **Vérification des données**

Les **variables principales** sélectionnées pour l'analyse et mesurées au niveau des parcelles élémentaires sont :

- rendement en paille (kg ha^{-1})
- rendement en grain (kg ha^{-1})
- indice de récolte (%)
- poids des grains par épi (g)
- nombre d'épis par poquet
- nombre de talles par poquet = tallage
- taux de survie à la récolte (%)
- taux de survie au démariage (%)
- nombre de poquets végétatifs
- nombre de poquets non matures

Une vérification des données encodées a d'abord été effectuée par des mises en graphiques des différentes variables par année et par site ainsi que par la réalisation de graphes de dispersion de type « boxplot » effectués par le logiciel *Minitab 14 Release 14.12.0*, et cela, par année, site, niveau de fertilisation, niveau de pratique de fertilité organique et variété.

Les graphes « boxplot » indiquent la médiane, la moyenne et la dispersion autour de la médiane (le rectangle comprend 50 % des observations et les moustaches inférieures et supérieures comprennent les premiers et les derniers 25 %). Cette analyse préliminaire a permis d'identifier les valeurs éloignées de leur moyenne de plus de 3 fois l'écart-type. Certaines erreurs d'encodage ont pu être corrigées. Les outliers et les valeurs suspectes ont été répertoriés dans une table.

b) **Analyse exploratoire des données**

L'analyse exploratoire a été réalisée en plusieurs étapes, sur base de graphes de dispersion de type « boxplot » et des tableaux de moyennes également effectués par *Minitab 14*. Nous avons effectué une analyse globale sur les 3 ans de l'essai, suivie d'une analyse par année et d'une analyse sur les parcelles témoins (non fumées, non fertilisées et de variété locale).

Il est clair que toutes les tendances et différences remarquées suite à l'analyse exploratoire ne sont peut-être pas significatives. Vu le nombre important de données, l'analyse reste globale. Les tests statistiques vont permettre d'affiner ce début d'analyse et de mettre en évidence les interactions entre facteurs.

c) Analyse de variance

➤ *Hypothèses de l'analyse de variance*

Nous allons analyser l'effet des différents facteurs sur les variables principales (ou variables dépendantes) citées ci-dessus. L'analyse de variance peut être effectuée à condition que **trois hypothèses** soient satisfaites :

- les observations suivent une distribution normale,
- les variances entre populations sont égales (les populations sont définies par les combinaisons de niveaux de facteurs),
- les échantillons dans lequel les observations sont effectuées sont indépendants et identiquement distribués, c'est-à-dire que les observations qui les constituent sont indépendantes et issues d'une même population.

Nous vérifions graphiquement et grâce aux coefficients de Skewness et de Kurtosis que les variables ont une distribution proche de la normale, à l'exception du nombre de poquets végétatifs et du nombre de poquets non matures. La distribution des variables est présentée à l'Annexe 4. Le coefficient de Skewness mesure le degré d'asymétrie de la distribution tandis que le coefficient de Kurtosis mesure le degré d'écrasement.

Nous avons effectué des tests d'égalité de la variance de Levene pour les différentes variables et niveaux de facteurs. Nous constatons que l'hypothèse d'égalité de la variance ne peut pas être acceptée pour la plupart des variables (résultats non présentés).

➤ *Modèle d'analyse de variance*

L'analyse exploratoire révélant de fortes différences entre années dues à une répartition différente de la pluie, l'analyse de variance sera effectuée année par année. Au sein de chaque année, nous développerons les effets principaux des facteurs et leurs interactions significatives. Nous réaliserons ensuite l'analyse combinée sur trois ans.

Le dispositif expérimental s'analyse par les **facteurs** suivants :

a = la fertilisation, facteur fixe à 3 niveaux

b = la variété, facteur fixe à 3 niveaux

C = la répétition, facteur aléatoire à 3 niveaux

d = la pratique de fertilité organique, facteur fixe à 5, 6 ou 7 niveaux

e = le site, facteur fixe à 3 niveaux

Les facteurs étant tous croisés, le dispositif expérimental s'analyse par une ANOVA à 5 facteurs croisés mixte. La structure en blocs aléatoires complets au sein d'une strate (les blocs étant les répétitions) a été élargie au niveau des strates et des sites, en considérant que ceux-ci étaient également randomisés. En pratique, nous utilisons un modèle linéaire mixte plutôt qu'un modèle linéaire standard car l'homogénéité des variances n'est pas garantie et le dispositif n'est pas équilibré la première année (certaines variables n'ayant pas été mesurées à Kodey). Un modèle linéaire mixte est une généralisation du modèle linéaire standard, **la**

généralisation étant que les données sont autorisées à présenter une corrélation et une variabilité non constante.

L'instruction « Modèles mixtes » dans le logiciel *SAS System Release 8.02* ajuste un ensemble de modèles linéaires mixtes aux données et permet d'utiliser ces modèles ajustés pour créer des inférences statistiques sur les données. Le modèle linéaire mixte permet de modéliser non seulement les moyennes des données mais aussi leurs variances et covariances.

➤ *Transformations de données*

En appliquant le modèle d'analyse de variance aux données, nous avons vérifié que les graphes de résidus étaient correctement distribués. Nous avons constaté que la variable « rendement en paille » présentait dans certains sites et certaines années un graphe de résidus à forme évasée (petites valeurs de résidus pour les petites valeurs prédites et grandes valeurs pour les grandes valeurs prédites). Nous avons transformé cette variable en prenant son logarithme pour effectuer l'analyse de variance.

D'autre part, les variables « taux de survie au démariage » et « taux de survie à la récolte » présentaient des graphes de résidus de forme légèrement inverse (petites valeurs de résidus pour les grandes valeurs prédites et grandes valeurs pour les petites valeurs prédites). Nous avons effectué une transformation $1/x$ afin de normaliser ces graphes.

La transformation de ces trois variables ne modifiant pas l'occurrence des effets statistiquement significatifs, nous avons choisi d'effectuer l'analyse de variance sur les variables originelles plutôt que sur leurs transformations, pour des raisons de facilité d'interprétation.

➤ *Tests et comparaisons à effectuer chaque année*

- **Facteur « fertilisation »** : Y a-t-il une différence significative entre les parcelles fertilisées avec du DAP, les parcelles fertilisées avec du DAP + urée et les parcelles non fertilisées ?
- **Facteur « variété »** : Y a-t-il une différence significative entre les parcelles semées avec les variétés locales, ICMV et Zatib ?
- **Facteur « pratique de fertilité organique »** : Y a-t-il une différence significative entre les 5, 6 ou 7 techniques de fertilité ?
- **Facteur « site »** : Y a-t-il une différence significative entre les 3 sites ?
- **Interactions entre les facteurs** : Y a-t-il des interactions significatives ?

Si certaines différences sont significatives, nous effectuerons des comparaisons de moyennes deux à deux à posteriori. Le test de Bonferroni est plus puissant que les tests de Tuckey et de Scheffé, également largement utilisés, c'est-à-dire qu'il possède une faculté de rejeter l'hypothèse nulle (d'accepter qu'il existe une différence significative) plus élevée. Dans cette analyse, l'occurrence des comparaisons statistiquement significatives ne différerait

pas selon les tests et le **test de Bonferroni** a été sélectionné pour effectuer ces comparaisons multiples.

Nous choisissons d'effectuer tous les tests au **niveau de confiance $\alpha = 0,05$** .

d) Analyse des corrélations entre variables

Une analyse de corrélation entre les variables principales a été menée par site et par année sur *Minitab 14*.

4. Pratiques culturales et calendrier

4.1. Installation de l'essai

La préparation des parcelles la première année a nécessité un nettoyage du champ effectué en avril par les agriculteurs. L'installation du dispositif expérimental fut effectuée par un technicien de l'ICRISAT au début mai. Vu la disposition des champs et la présence d'arbres au sein des champs, la forme des strates n'a pas pu être parfaitement rectangulaire dans tous les cas (Figure 18).

4.2. Semis

Le semis a lieu après la première pluie importante de la saison (si possible supérieure à 20 mm). La densité de semis est de 10000 poquets ha⁻¹. Les poquets manquants sont ressemés quelques jours après le semis. Les dates et pluies de semis sont reprises dans le Tableau 4.

La Figure 23 résume schématiquement les dates de semis et de récolte du mil. En 2004, le semis effectué le 20 mai à Bagoua a été suivi d'une période de sécheresse et un resemis total a été nécessaire le 21 juin sauf dans la strate PA03. A Banizoumbou, le semis a été réalisé le 30 juin après une pluie de 26,5 mm alors qu'une première pluie importante avait déjà eu lieu le 19 mai (45 mm). Une charge de travail importante et le manque de main d'œuvre expliquent ce délai de semis d'un mois.

Etant donné que l'essai vise à imiter les conditions paysannes, aucun traitement phytosanitaire n'a été appliqué.

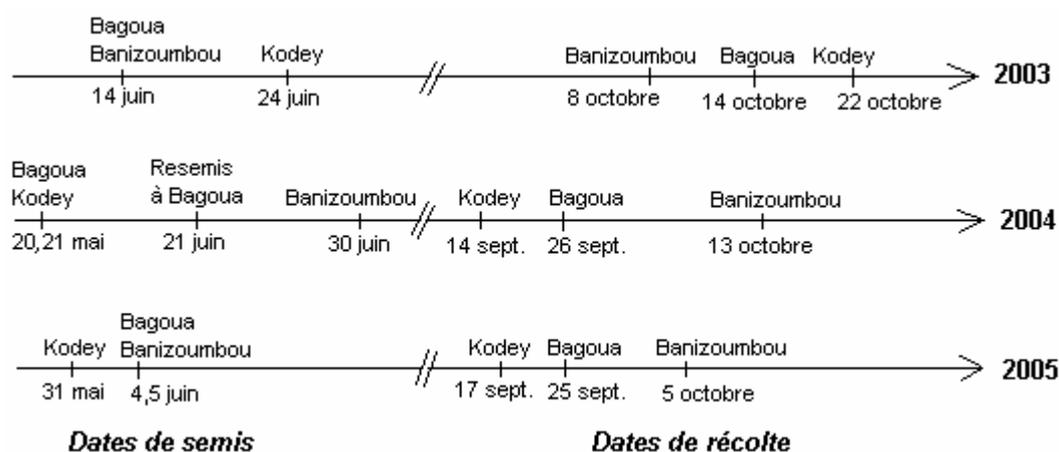


Figure 23. Lignes du temps schématiques des dates de semis et de récolte du mil

4.3. Sarclages et démariage

Les dates auxquelles ont été effectués les sarclages et le démariage sont reprises par année dans le Tableau 4. Le premier sarclage est effectué environ une quinzaine de jours après le semis. Le second sarclage a lieu plus tard dans la saison, approximativement 1 à 1,5 mois après le premier en fonction de la charge de travail des agriculteurs.

Le démariage a lieu dans le mois suivant le semis. Il permet d'éclaircir la culture à 3 plants par poquet. Les plants restants sont favorisés car ils bénéficient d'une compétition moindre pour les ressources.

4.4. Récolte

Les dates de récolte sont indiquées dans la Figure 23. La durée du cycle cultural peut être calculée par la différence entre la date de récolte et la date du semis.

Les plants faisant partie des bordures autour de chaque parcelle n'ont pas été pris en compte dans la récolte. Celle-ci commence par l'abattage des plants de bordure afin d'individualiser chaque parcelle et pour éviter le mélange des récoltes entre parcelles. La superficie récoltée par parcelle est donc de $9 \times 9 = 81 \text{ m}^2$ (Figure 24). On commence par couper les épis à l'aide d'un couteau et on les rassemble pour qu'ils soient comptés et pesés. Les tiges sont ensuite abattues à la machette.

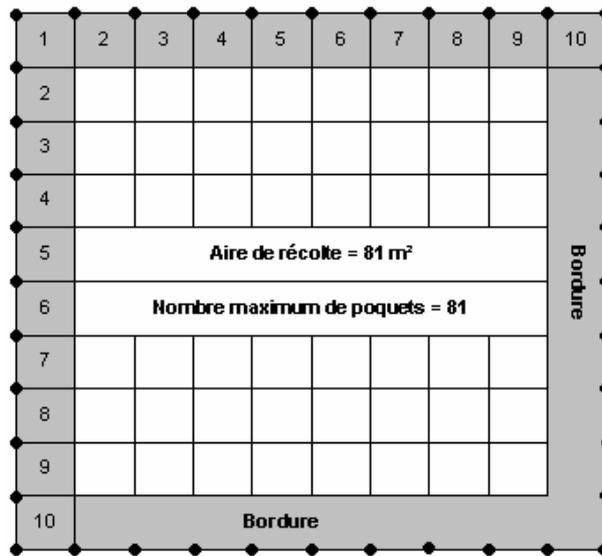


Figure 24. Schéma d'une parcelle (100 m²). Chaque croisement indique l'emplacement d'un poquet, les poquets de bordure sont signalés par un point noir.

Tableau 4. Calendrier des opérations culturales et pluviométrie (DOY = day of the year, jour de l'année)

		<i>Banizoumbou</i>			<i>Bagoua</i>			<i>Kodey</i>		
		Date	DOY	Pluie (mm)	Date	DOY	Pluie (mm)	Date	DOY	Pluie (mm)
2003	<i>Semis</i>	14-juin	165	30	14-juin	165	30	24-juin	175	17
	<i>1er sarclage</i>	27-juin			27-juin			9-juil		
	<i>Démariage</i>	10-juil			*			*		
	<i>Application urée</i>	7-août			7-août			7-août		
	<i>2ème sarclage</i>	7-août			7-août			7-août		
	<i>Récolte</i>	8-oct	281		14-oct	287		22-oct	295	
	<i>Durée du cycle cultural</i>		116			122			120	
	<i>Total pluviométrie</i>			474			452			371
	<i>Total pluviométrie utile</i>			471			447			347
2004	<i>Semis</i>	30-juin	182	26,5	20-mai	141	40	21-mai	142	58
	<i>Resemis</i>	/			21-juin	173	20 et 24	/		
	<i>1er sarclage</i>	16-juil			7-juil			13-juin		
	<i>Démariage</i>	19-juil			17-juil			22-juin		
	<i>Application urée</i>	*			2-août			3-juil		
	<i>2ème sarclage</i>	14-août			31-juil			17-juil		
	<i>Récolte</i>	13-oct	287		26-sept	270		14-sept	258	
	<i>Durée du cycle cultural</i>		105			97			116	
	<i>Total pluviométrie</i>			472			432			582
	<i>Total pluviométrie utile</i>			404			432			535
2005	<i>Semis</i>	5-juin	156	12,5	4-juin	155	17	31-mai	151	27
	<i>1er sarclage</i>	19-juin			18-juin			18-juin		
	<i>Démariage</i>	28-juin			27-juin			27-juin		
	<i>Application urée</i>	8-juil		21	9-juil		7	6-juil		40 et 9
	<i>2ème sarclage</i>	31-juil			30-juil			19-juil		
	<i>Récolte</i>	5-oct	278		25-sept	268		17-sept	260	
	<i>Durée du cycle cultural</i>		122			113			109	
	<i>Total pluviométrie</i>			444			453			430
	<i>Total pluviométrie utile</i>			407			381			399

*données non communiquées

4^{ème} partie : Résultats et discussion

1. Pluviométrie

1.1. Pluviométrie en 2003

La pluviométrie moyenne dans le site d'étude est de 495 mm (période de 1968 à 1989) (Hiernaux et Ayantunde, 2004). La pluviométrie totale en 2003 est de 474 mm à Banizoumbou, 452 mm à Bagoua et 371 mm à Kodey. La distribution de la pluie par site et les pluies de semis sont reprises en Annexe 5. Le graphe des pluviométries cumulées (Figure 25) indique que les 3 sites subissent une période sèche pendant la deuxième quinzaine de juillet, particulièrement marquée à Kodey.

Le Tableau 5 reprend la distribution des **périodes sèches**. Celles-ci sont déterminées par une période de 10 jours (ou plus) sans pluie ou présentant de faibles pluies (pluies intermédiaires ≤ 7 mm). Rappelons que 35 à 45 % de la pluie s'évapore et que les pluies inférieures à 5 mm sont perdues par évaporation endéans 24 h (Bationo et al., 1998). Les phases de développement pendant lesquelles ont lieu les périodes sèches sont déterminées selon de Rouw et Rajot (2004) : phase végétative (phase 1), phase reproductive (phase 2) et phase de remplissage des grains (phase 3).

Notons que la période sèche perturbant la phase végétative est plus longue à Kodey et que ce site est le seul à endurer une seconde période sèche du 7 au 23 août, en phase reproductive.

Tableau 5. Détermination des périodes sèches après semis en 2003, des pluies ≤ 7 mm au sein d'une période sèche et des phases de développement correspondantes (phase 1: 0-50 JAS, phase 2: 50-75 JAS, phase 3 : >75 JAS)

Site	Début		Pluies intermédiaires			Fin			Durée jours	Phase de développement
	Date	JAS	Date	JAS	Pluie	Date	JAS	Pluie		
<i>Banizoumbou</i>	10-juil	26	/	/	/	23-juil	39	30 mm	13	Phase 1
<i>Bagoua</i>	10-juil	26	23-juil	39	6 mm	2-août	49	15 mm	23	Phase 1
<i>Kodey</i>	10-juil	16	2-août	39	7 mm	7-août	44	50 mm	28	Phase 1
<i>Kodey</i>	7-août	44	15-août	52	6 mm	23-août	60	65 mm	16	Phase 2

1.2. Pluviométrie en 2004

La pluviométrie totale en 2004 est de 472 mm à Banizoumbou, 432 mm à Bagoua et 582 mm à Kodey. La distribution de la pluie par site et les pluies de semis sont reprises en Annexe 5. Le graphe des pluviométries cumulées (Figure 25) indique une très faible pluviométrie entre le 19 mai (première pluie) et le 20 juin. La période sèche après semis à

Bagoua a donné lieu à un resemis (excepté dans la strate PA03). Banizoumbou a été semé plus tard et n'a pas été atteint par cet épisode sec.

Malgré une pluviométrie totale importante (due à une pluie record de 96 mm le 20 juin), Kodey est le seul site à souffrir de périodes sèches durant les trois phases de développement (Tableau 6).

Tableau 6. Détermination des périodes sèches après semis en 2004, des pluies ≤ 7 mm au sein d'une période sèche et des phases de développement correspondantes (phase 1: 0-50 JAS, phase 2: 50-75 JAS, phase 3 : >75 JAS)

Site	Début		Pluies intermédiaires			Fin			Durée jours	Phase de développement
	Date	JAS	Date	JAS	Pluie	Date	JAS	Pluie		
Bagoua	19-mai	*	2-juin	*	1,3 mm	19-juin	*	20 mm	31	Resemis le 20 juin
			6-juin	*	2,2 mm					
Kodey	21-mai	0	6-juin	16	6 mm	9-juin	19	14 mm	21	Phase 1
Kodey	9-juin	19	/	/	/	20-juin	30	96 mm	11	Phase 1
Kodey	21-juil	61	/	/	/	2-août	73	32 mm	12	Phase 2
Kodey	8-août	79	/	/	/	22-août	93	32 mm	14	Phase 3

* période avant resemis le 20 juin

1.3. Pluviométrie en 2005

La pluviométrie totale en 2005 est de 444 mm à Banizoumbou, 453 mm à Bagoua et 430 mm à Kodey. La distribution de la pluie par site et les pluies de semis sont reprises en Annexe 5. La distribution de la pluviométrie dans le temps suit la même tendance dans les trois sites (Figure 25).

Tous les sites sont atteints à des degrés divers par des périodes sèches (Tableau 7).

Tableau 7. Détermination des périodes sèches après semis en 2005, des pluies ≤ 7 mm au sein d'une période sèche et des phases de développement correspondantes (phase 1: 0-50 JAS, phase 2: 50-75 JAS, phase 3 : >75 JAS)

Site	Début		Pluies intermédiaires			Fin			Durée jours	Phase de développement
	Date	JAS	Date	JAS	Pluie	Date	JAS	Pluie		
Banizoumbou	11-juin	6	22-juin	17	4,2 mm	26-juin	21	26,5 mm	15	Phase 1
Banizoumbou	18-juil	43	/	/	/	31-juil	56	9,1 mm	13	Phase 1 et 2
Banizoumbou	17-août	73	29-août	85	4,4 mm	2-sept	89	13 mm	16	Fin phase 2 et phase 3
			30-août	85	2,2 mm					
Banizoumbou	8-sept	95	20-sept	107	2,3 mm	26-sept	113	18 mm	18	Phase 3
Bagoua	11-juin	7	22-juin	18	5 mm	2-juil	28	7,4 mm	21	Phase 1
			26-juin	22	2 mm					
Bagoua	18-juil	44	/	/	/	31-juil	57	45 mm	13	Phase 1 et 2
Bagoua	17-août	74	29-août	86	5 mm	8-sept	96	10,5 mm	22	Fin phase 2 et phase 3
			30-août	87	3 mm					
			2-sept	90	1,1 mm					
			6-sept	94	4 mm					
Kodey	11-juin	11	/	/	/	22-juin	22	10 mm	11	Phase 1
Kodey	17-juil	48	/	/	/	31-juil	61	28 mm	13	Phase 1 et 2
Kodey	17-août	78	/	/	/	29-août	90	12 mm	12	Phase 3

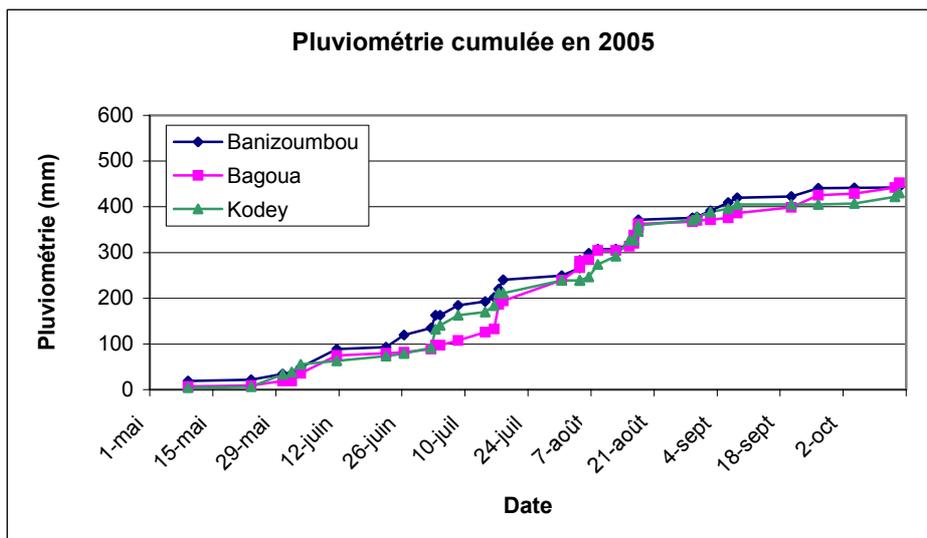
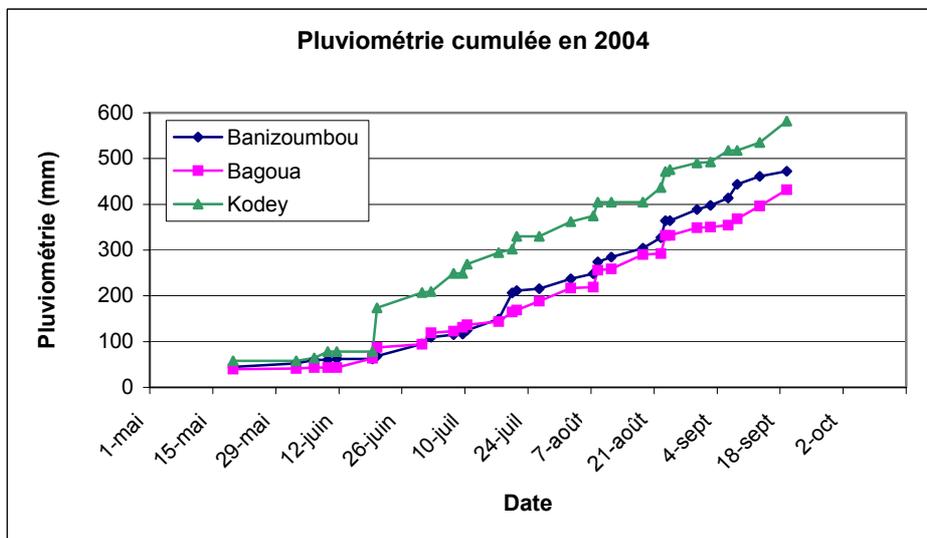
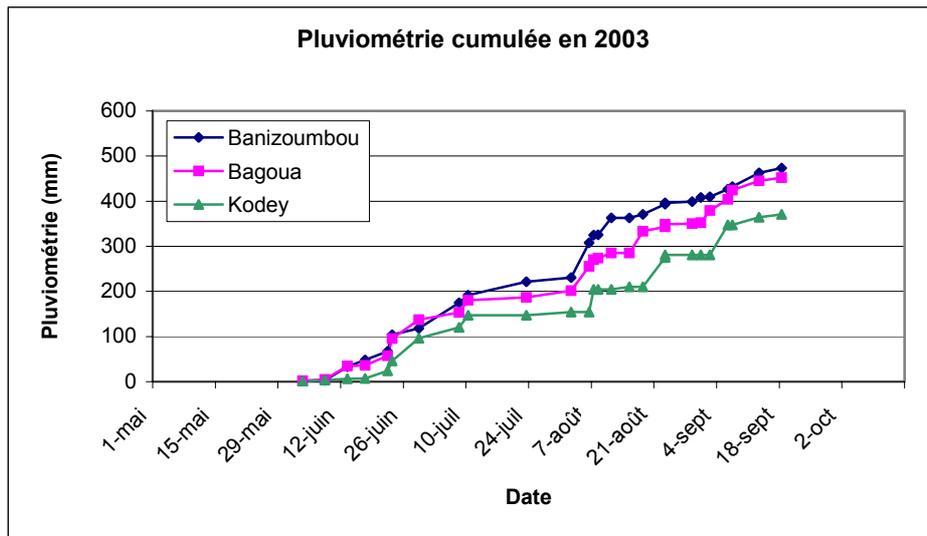


Figure 25. Pluviométrie cumulée en 2003, 2004 et 2005

1.4. Pluviométrie utile et durée du cycle cultural

La quantité de pluie utile à la croissance et au développement du mil est comptabilisée entre le semis et la récolte (Figure 26). Si l'on considère la pluviométrie totale utile moyennée sur les trois sites, la meilleure année est 2004 (457 mm) et la plus sèche 2005 (396 mm), mais il faut noter que la valeur de 2004 est élevée à cause de la pluviométrie importante à Kodey cette année-là. Remarquons la pluviométrie utile est la plus faible à Kodey en 2003, à Banizoumbou en 2004 et à Bagoua en 2005.

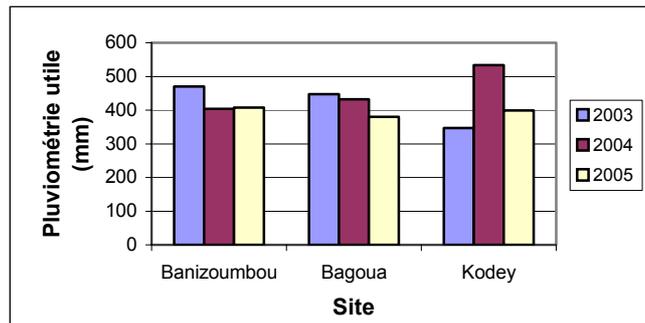


Figure 26. Pluviométrie utile totale par site et année

La durée du cycle cultural est définie par le nombre de jours entre le semis et la récolte (Tableau 4). Les cycles culturaux sont plus longs en 2003 sauf à Banizoumbou où le cycle cultural est plus long en 2005 (Figure 27).

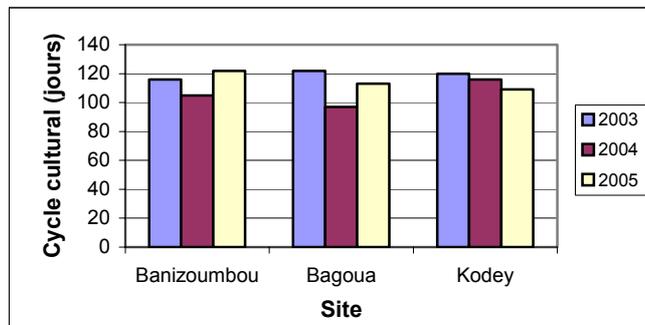


Figure 27. Durée du cycle cultural par site et année

2. Evolution de l'eau utile disponible

L'évolution de l'eau utile disponible par site et saison culturale est présentée dans les Figure 28 et Figure 29. Rappelons que l'eau utile disponible (EU) a été calculée en soustrayant les teneurs en eau critiques aux teneurs en eau mesurées. L'EU est calculée sur la couche de sol allant de la surface à la profondeur d'enracinement maximale (1,50 m). Avant que les racines n'atteignent cette profondeur, l'EU pour la plante peut être inférieure à celle calculée si l'avancement du front d'humectation dépasse la vitesse de croissance des racines

(Sivakumar et Salaam, 1999). Le taux de croissance des racines peut être estimé à 0,02 m jour⁻¹ (Rockström et de Rouw, 1997, cités par Biielders et al., 2004), la profondeur d'enracinement maximale serait donc atteinte à partir de 75 JAS. D'autre part, notons que les mesures de profils de teneur en eau ont été effectuées à plus de 15 jours d'intervalle en 2004 à Bagoua et à Kodey, les périodes de stress hydriques ne pourront pas être cernées avec précision.

En 2004, les graphes (Figure 28) indiquent que les valeurs d'EU sont globalement très faibles (entre 0 et 16 mm pour un profil de 1,50 m) et que la réhumectation du sol après une pluie est extrêmement faible par rapport à 2005 (Figure 29). La courbe de calibration utilisée pour obtenir les teneurs en eau du sol à partir des comptages effectués par la sonde pourrait comporter des erreurs. En conséquence, les courbes d'eau utile en 2004 ne seront analysées que de manière qualitative.

En 2004, nous observons que l'EU moyenne à Banizoumbou chute à 15 et 47 JAS ; nous ne considérons pas ces deux dates comme des périodes de stress hydrique car la pluviométrie est régulière. Dans ce champ, la strate PA04 possède la plus faible EUD et les strates PA02 et NF les valeurs les plus élevées. Ceci s'explique par le fait que l'apport de fumier récent favorise le développement racinaire (Michels et Biielders, 2006) et permet une croissance initiale des feuilles plus rapide, ce qui accroît fortement la perte en eau par transpiration (Bationo et al., 1998 ; Shapiro et Sanders, 1997). A Bagoua, l'EU est nulle à 39 et 77 JAS. L'EU reste très faible entre ces deux dates, signe que Bagoua subit une période sèche (à 39 JAS, la profondeur d'enracinement est de 0,78 m) que l'analyse de la pluviométrie n'avait pas permis de déceler (Figure 25). Cette période sèche supplémentaire est indiquée dans le Tableau 8. A Kodey, les 3^{ème} et 4^{ème} périodes sèches déterminées par l'analyse de la distribution des pluies (Tableau 6) concordent avec l'évolution de l'EU, les deux premières périodes sèches ayant lieu avant le début des mesures de teneur en eau. Une première chute de l'EU a lieu à 57 JAS et une période où l'EU reste constante à moins d'un mm en moyenne est marquée entre 77 et 95 JAS.

En 2005 à Banizoumbou, les 4 périodes sèches déterminées par l'analyse de la distribution des pluies (Tableau 7) trouvent leur pendant en baisses de l'EU. A Bagoua, nous relevons deux périodes critiques en terme d'EU, à 56 JAS (2 mm) et à 83 JAS (8 mm) correspondant aux deux dernières périodes sèches. La première période sèche déterminée (7 à 28 JAS) correspond cependant à une remontée de l'EU. A Kodey, nous observons 4 baisses de l'EU, la dernière ayant lieu après la récolte. L'EU moyenne ne descend jamais sous 10 mm.

Tableau 8. Durée de la période sèche supplémentaire au Tableau 6 et phase de développement correspondante (phase 1: 0-50 JAS, phase 2: 50-75 JAS, phase 3 : >75 JAS)

Année	Site	Début		Fin		Durée jours	Phase de développement
		Date	JAS	Date	JAS		
2004	Bagoua	30-juil	39	6-sept	77	38	Phase 1 et 2

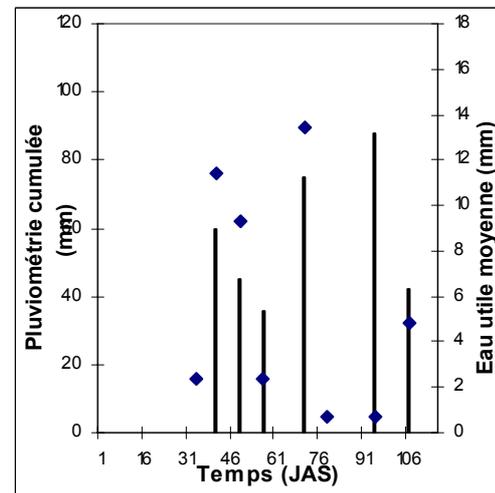
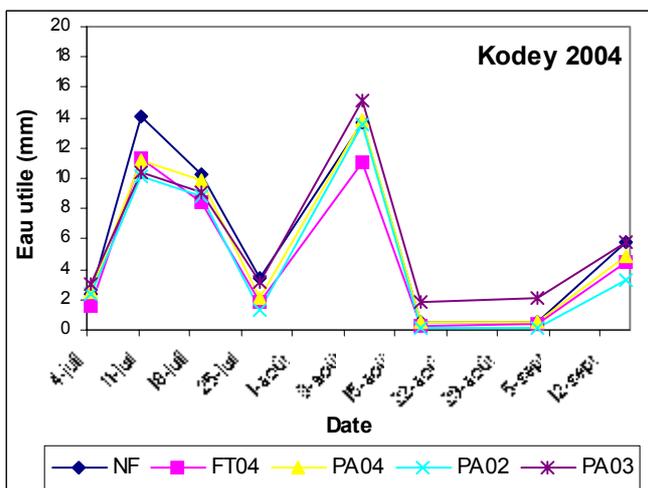
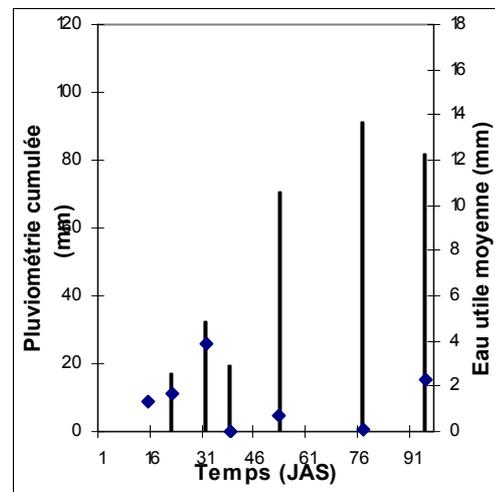
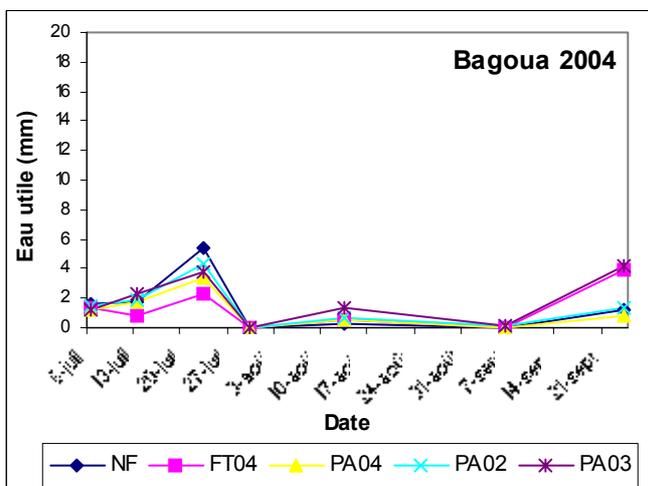
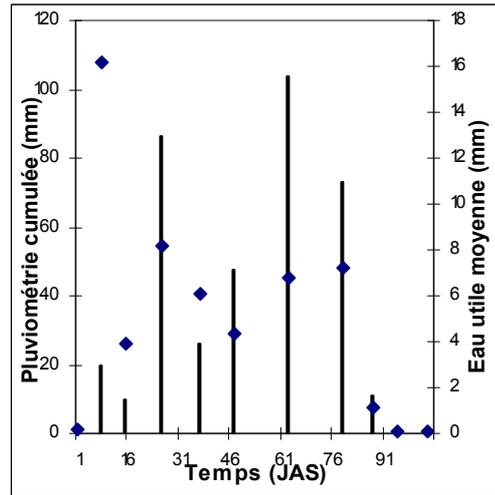
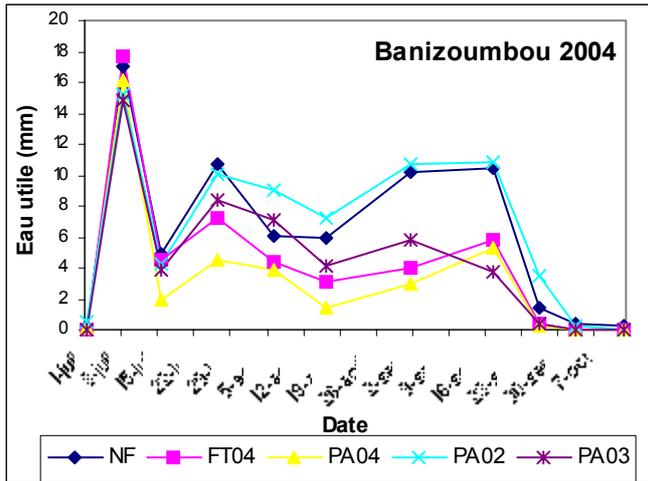


Figure 28. Eau utile par strate et par site (à gauche) et comparaison entre pluviométrie cumulée (histogramme) sur la période entre deux mesures de sonde à neutron et eau utile (♦) moyenne par site (à droite) en 2004

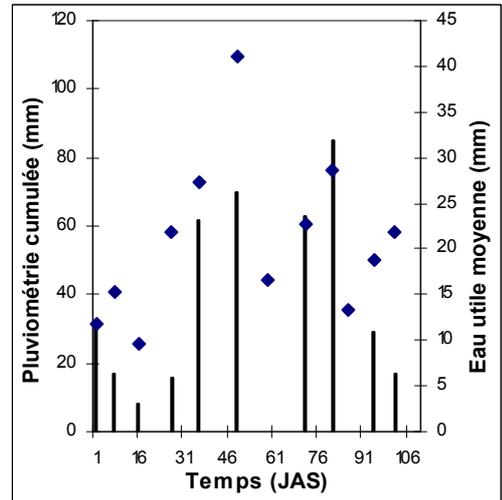
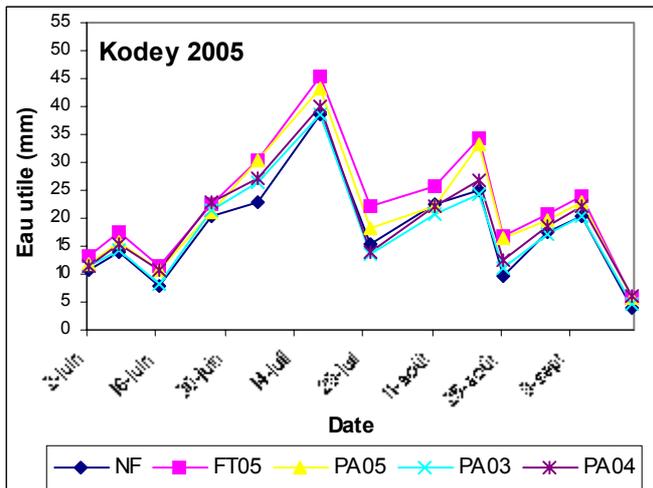
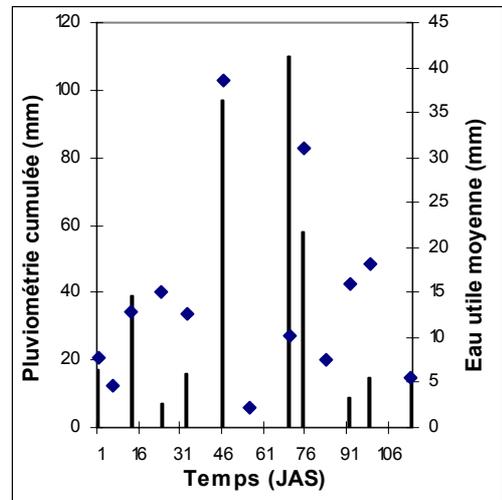
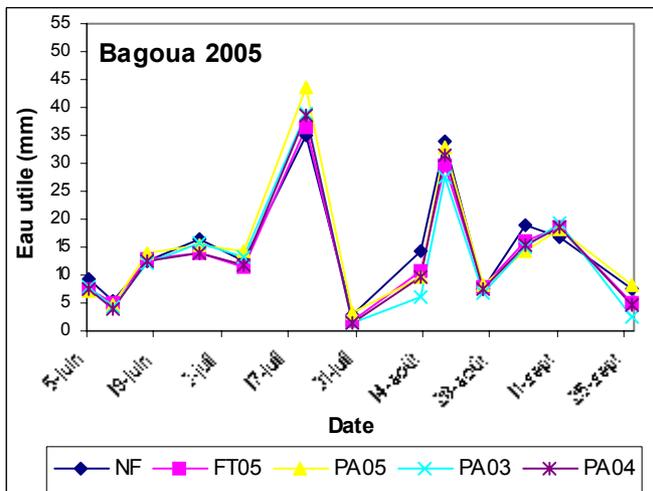
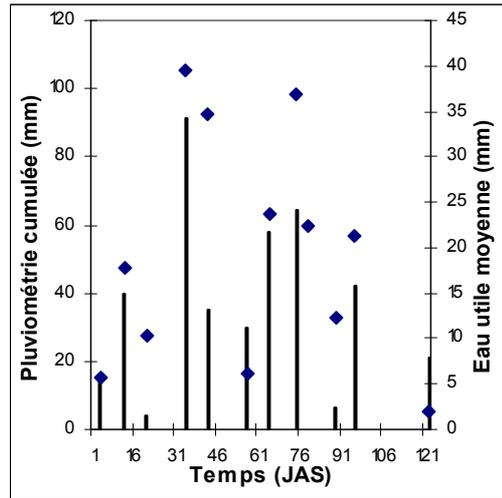
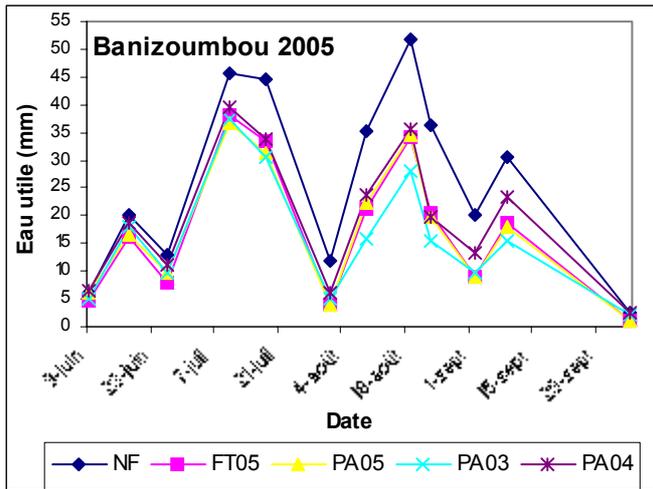


Figure 29. Eau utile par strate et par site (à gauche) et comparaison entre pluviométrie cumulée (histogramme) sur la période entre deux mesures de sonde à neutron et eau utile (♦) moyenne par site (à droite) en 2005

3. Propriétés physico-chimiques des sols

3.1. Analyses chimiques des sols

Tableau 9. Résultats des analyses chimiques des sols (échantillons prélevés le 2 juin 2003)

Variable	Profondeur	Bagoua		Banizoumbou		Kodey	
		Moyenne	Ecart-type	Moyenne	Ecart-type	Moyenne	Ecart-type
$pH H_2O$ (1:2,5)	0-10cm	5,5	0,1	5,8	0,1	5,5	0,1
	10-20cm	5	0,1	5,2	0,1	5,1	0,1
	20-40cm	4,9	0	4,8	0,1	4,8	0,1
$pH KCl$ (1:2,5)	0-10cm	4,9	0,1	5,2	0,1	5,0	0,1
	10-20cm	4,2	0,0	4,4	0,1	4,5	0,1
	20-40cm	4,0	0,0	4,1	0,0	4,2	0,0
H^+ ($cmol+ kg^{-1}$)	0-10cm	0,06	0,01	0,06	0,01	0,06	0,01
	10-20cm	0,14	0,01	0,13	0,01	0,13	0,01
	20-40cm	0,19	0,01	0,2	0,01	0,17	0,01
Al^{3+} ($cmol+ kg^{-1}$)	0-10cm	0,02	0,01	0	0,00	0,01	0,00
	10-20cm	0,19	0,02	0,12	0,02	0,16	0,03
	20-40cm	0,37	0,02	0,3	0,01	0,26	0,02
C_{org} (%)	0-10cm	0,21	0,01	0,18	0,01	0,16	0,01
	10-20cm	0,15	0,00	0,14	0,00	0,12	0,00
	20-40cm	0,13	0,00	0,12	0,00	0,10	0,00
Total-N ($mg N kg^{-1}$)	0-10cm	193,91	9,57	185,2	11,00	159,66	8,62
	10-20cm	144,27	3,64	155,03	5,59	127,78	4,15
	20-40cm	123,86	1,52	132,87	2,58	116,83	3,27
P-Bray ($mg P kg^{-1}$)	0-10cm	6,36	0,27	4,24	0,21	4,7	0,65
	10-20cm	3,45	0,12	2,67	0,14	2,57	0,09
	20-40cm	2,44	0,08	1,99	0,11	2,13	0,05
CEC ($cmol+ kg^{-1}$)	0-10cm	1,38	0,14	1,23	0,11	1,54	0,09
	10-20cm	1,38	0,16	1,2	0,09	1,39	0,07
	20-40cm	1,48	0,15	1,05	0,08	1,39	0,12
$H^+ + Al^{3+}/CEC$ (%)	0-10cm	7	.	6	.	7	.
	10-20cm	28	.	23	.	24	.
	20-40cm	44	.	49	.	35	.

Les résultats des analyses chimiques initiales des sols sont présentés dans le Tableau 9. Le pH-H₂O est compris entre 4,8 et 5,8, le sol devient plus acide en profondeur. Le sol est légèrement moins acide à Banizoumbou que dans les deux autres sites. La concentration en H⁺ est semblable dans les trois sites : elle varie entre 0,12 et 0,13 cmol₊ kg⁻¹ et augmente avec la profondeur d'échantillonnage. Dans ces sols acides, Al³⁺ est présent sur le complexe d'échange. La concentration en Al³⁺ augmente lorsque que le pH diminue ; elle atteint 0,37 cmol₊ kg⁻¹ à Bagoua, 0,30 cmol₊ kg⁻¹ à Banizoumbou et 0,26 cmol₊ kg⁻¹ à Kodey dans l'échantillon le plus profond (20-40 cm). Les teneurs en C_{org} (< 0,2 %) et en azote total (compris en moyenne entre 135 mg N kg⁻¹ à Kodey et 158 mg N kg⁻¹ à Banizoumbou) sont très faibles et diminuent avec la profondeur. La teneur en C_{org} est en moyenne la plus élevée à Bagoua et la plus faible à Kodey. Le rapport C/N du sol est proche de 10 dans les trois sites. Les teneurs en P disponible sont comprises entre 6 mg P kg⁻¹ à Bagoua (0-10 cm) et 2 mg P kg⁻¹ à Banizoumbou (20-40 cm). Ces faibles teneurs en P disponible peuvent limiter les rendements : 8 mg P kg⁻¹ sont nécessaires pour atteindre 90 % des rendements potentiels en

mil (Bationo et Mokwunye, 1991, cités par Muehlig-Versen et al., 2003). Enfin, la CEC est également très faible : elle vaut en moyenne $1,4 \text{ cmol}_+ \text{ kg}^{-1}$ à Bagoua et à Kodey et $1,2 \text{ cmol}_+ \text{ kg}^{-1}$ à Banizoumbou. La CEC varie peu avec la profondeur tandis que la part de l'acidité d'échange (H^+ et Al^{3+}) dans la CEC augmente avec la profondeur, à mesure que le C_{org} et le pH diminuent.

Les sols des 3 champs présentent des caractéristiques chimiques peu différentes. Soulignons cependant que C_{org} , N total et P disponible dans l'échantillon de surface sont plus élevés à Bagoua, site qui nous paraît chimiquement légèrement avantagé par rapport aux autres. La teneur en P disponible relativement élevée dans l'échantillon de surface (0-10 cm) conforte l'idée que le champ de Bagoua ait bénéficié d'une fertilisation (parcages) antérieure à l'installation de l'essai, ce qui a été confirmé par le propriétaire du champ.

3.2. Analyse texturale des sols

Les résultats de l'analyse texturale effectuée sur des échantillons prélevés avant l'installation de l'essai en 2003 sont présentés dans le Tableau 10. Les sols sont très sableux (> 90 % de sable) et présentent des conductivités hydrauliques à saturation (K_o) élevées. Le champ de Banizoumbou montre une teneur moyenne plus élevée en argile et en limon. D'autre part, Kodey présente une teneur en argile légèrement plus élevée que Bagoua.

Tableau 10. Résultats d'analyse texturale (moyennes de 0 à 210 cm de profondeur)

	Bagoua	Banizoumbou	Kodey
<i>Argile (%)</i>	4,4	7,5	5,6
<i>Limon (%)</i>	2,0	2,7	2,0
<i>Sable (%)</i>	93,6	89,9	92,4
<i>K_o (cm h⁻¹)</i>	20,5	15,1	18,7

La texture change graduellement avec la profondeur ; les profils s'enrichissent en argile (Figure 30). La teneur en limon varie très peu avec la profondeur (graphe non présenté). L'enrichissement en argile dans le fond du profil est le plus important à Banizoumbou et le plus faible à Bagoua.

La granulométrie indique que Banizoumbou possède une teneur en argile plus élevée, donc à priori une meilleure structure et une rétention des cations sur le complexe d'échange plus importante. Nous avons toutefois constaté que ce site ne possédait pas la CEC la plus élevée, celle-ci dépendant également de la matière organique. D'autre part, le champ de Banizoumbou montre une propension plus élevée à former des croûtes en surface du sol et il présente également la conductivité hydraulique à saturation la plus faible des trois champs.

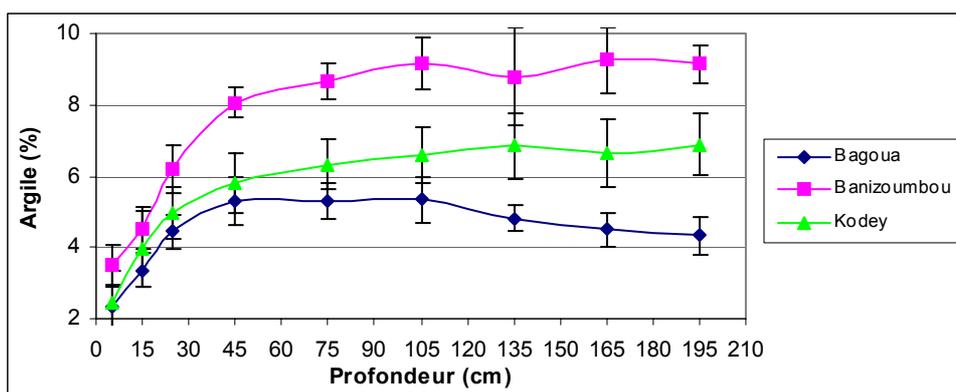


Figure 30. Teneur en argile (moyennes et écart-types) en fonction de la profondeur

4. Evaluation des apports en matière organique

4.1. Apports résiduels en matière organique en 2003

Les parages et le transport de fumier effectués en 2003, ainsi que les parages des années antérieures ont été exécutés par les paysans sans qu'aucune mesure de la quantité de fumier distribuée dans les parcelles n'ait été effectuée. Les résultats sont donc difficilement comparables avec ceux des années suivantes. Les mesures de matière organique (MO) résiduelle au sol dans les strates FT03 et PA03 effectuées en 2004 peuvent cependant donner une indication des sites où la quantité de fumier apporté en 2003 était particulièrement élevée. La MOF résiduelle mesurée en 2004 à Kodey dans la strate PA03 semble indiquer que la dose de fumier apportée dans cette strate en 2003 aie été plus élevée que dans les autres villages ou que le fumier s'y est moins décomposé (Figure 31).

4.2. Apports résiduels en matière organique en 2004

Bien qu'en quantité très faible, on observe que la strate non fumée à Bagoua contient de la matière organique d'origine fécale (MOF) (Figure 31). Cela est expliqué par l'historique du champ où l'essai a été installé, la MOF récoltée dans le plateau résultant de parages effectués par l'agriculteur avant l'installation de l'essai. Notons que les quantités de MOF résiduelle mesurées à Bagoua sont nettement inférieures dans la strate PA04 et nettement supérieures dans la strate FT04 par rapport aux autres villages. Dans ces deux strates de fertilité organique, la MOF est plus importante à Banizoumbou qu'à Kodey.

La disparition rapide de la MOF après la 1^{ère} année de parage est bien visible au champ mais les données des apports des années antérieures ne sont pas disponibles pour la quantifier.

Les grandes variations entre sites peuvent être dues au fait que la prise des échantillons est intervenue après une durée variable après la fin du parcage (celui-ci a eu lieu en janvier, février, mars, l'échantillonnage en mai-juin). D'autre part, il existe vraisemblablement des différences en terme de quantité et de qualité de MO appliquée par les paysans des différents villages.

Les résidus de matière organique d'origine végétale (MOV) sont particulièrement importants à Banizoumbou dans les strates FT03 et FT04 (Figure 32).

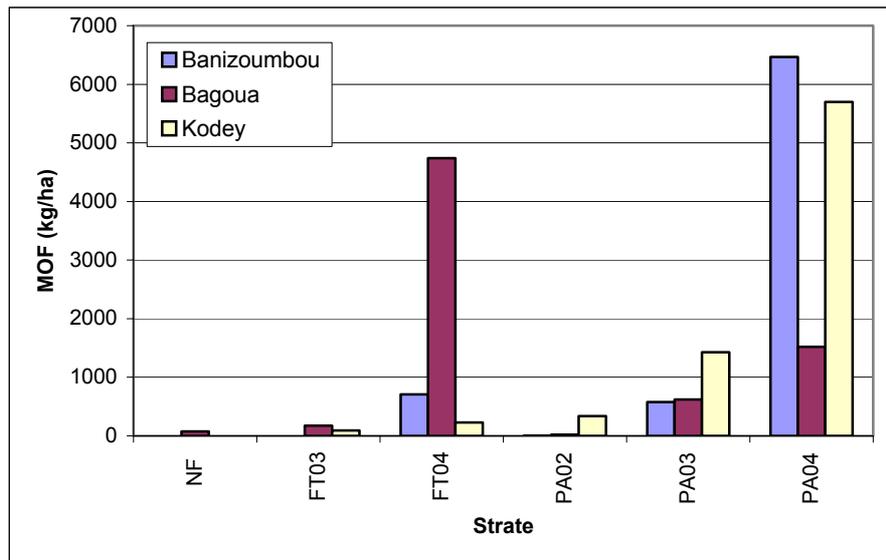


Figure 31. Apports résiduels en matière organique fécale (MOF) (kg ha^{-1}) en 2004

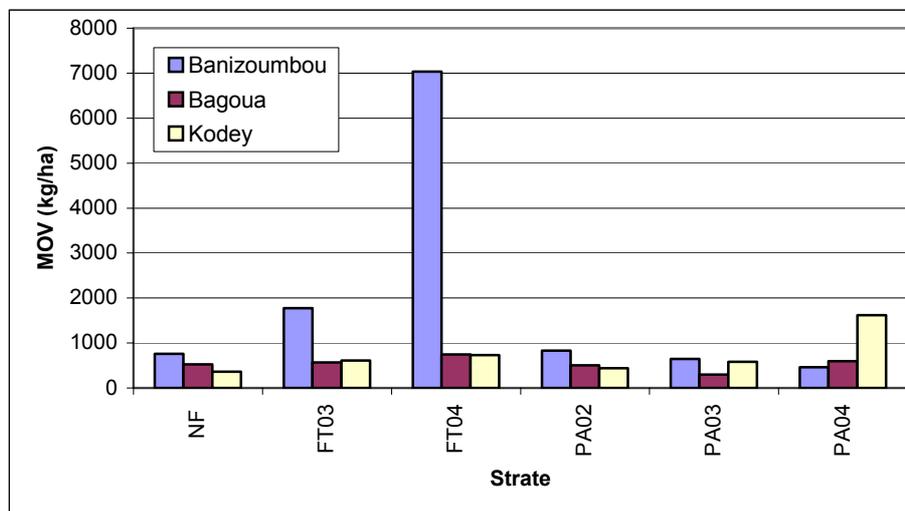


Figure 32. Apports résiduels en matière organique végétale (MOV) (kg ha^{-1}) en 2004

4.3. Apports résiduels en matière organique en 2005

Etant donné les mesures d'apports résiduels très différentes entre sites et strates en 2004, les chercheurs ont effectué une application contrôlée de 180 kg fumier par parcelle à Kodey uniquement dans les strates FT05 et PA05. Nous remarquons néanmoins que les

différences en MOF entre PA05 et FT05 sont très importantes (Figure 33). Lors de la mesure au plateau environ 3 mois après application du fumier, uniquement 26 % des 18000 kg fumier ha^{-1} initiaux subsistent en PA05 et seulement 3 % en FT05.

Les quantités de MOF mesurées pour estimer les apports de fumier fournis par le parcage et le fumier transporté de 2005 sont très semblables dans les trois villages. La strate PA05 enregistre les maxima dans chaque site.

Notons la disparition élevée de MOF en PA04 et FT04 par rapport aux quantités mesurées en 2004 (Tableau 11), la disparition de fumier dans les strates plus anciennes (PA03 et FT03) étant en général plus faible (excepté à Bagoua dans la strate PA04). Ceci reflète que les taux de décomposition du fumier diminuent avec le temps : les composants restants sont plus difficiles à minéraliser (de Rouw et Rajot, 2004).

L'enrichissement en fumier enregistré à Banizoumbou dans la strate FT03 (+34 $kg\ ha^{-1}$) peut s'expliquer par la variabilité spatiale de la distribution du fumier au champ ou par le passage d'un troupeau sur le champ après la saison culturale 2004.

Les quantités de MOF mesurées en 2005 sont globalement inférieures ou similaires à celles mesurées dans les strates de même âge en 2004 (Figure 31 et Figure 33), excepté à Bagoua pour le parcage et à Kodey pour le fumier transporté où les quantités sont nettement plus importantes en 2005 qu'en 2004.

Les résidus de matière organique d'origine végétale sont particulièrement importants à Banizoumbou dans les strates FT04 et FT05 (Figure 34).

Tableau 11. Disparition de matière organique fécale (MOF) entre 2004 et 2005 (en $kg\ ha^{-1}$ de MOF mesurée en 2004)

Strate	Banizoumbou $kg\ ha^{-1}$	Bagoua $kg\ ha^{-1}$	Kodey $kg\ ha^{-1}$
NF	0	-76	0
FT04	-615	-4716	-203
FT03	34	-176	-95
PA04	-5020	-669	-4932
PA03	-525	-552	-1298

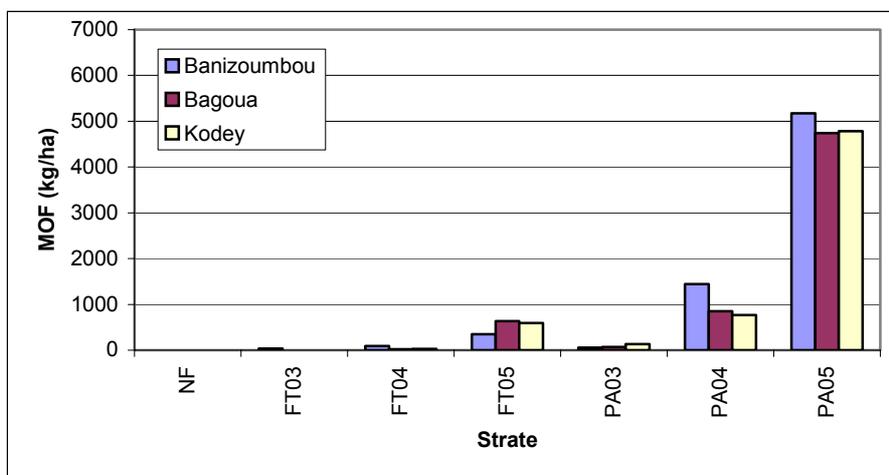


Figure 33. Apports résiduels en matière organique fécale (MOF) ($kg\ ha^{-1}$) en 2005

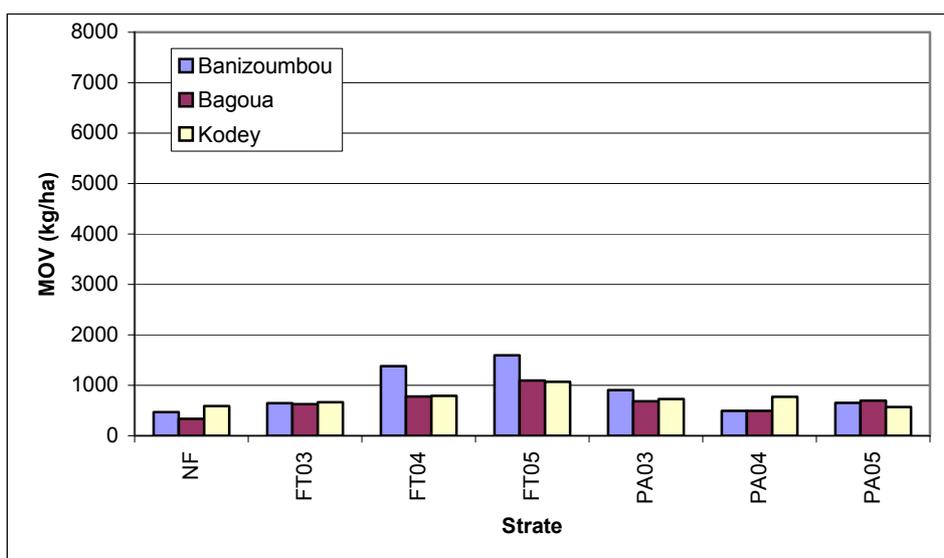


Figure 34. Apports résiduels en matière organique végétale (MOV) (kg ha^{-1}) en 2005

5. Analyse des corrélations entre variables

Les tableaux de corrélations complets sont repris en Annexe 6. Les tableaux simplifiés sont repris ci-dessous (Tableau 12).

Détaillons les corrélations significatives sur tous les sites. Les corrélations positives entre **rendement en grain et rendement en paille** ainsi qu'entre **rendement en grain et poids des grains par épi** se marquent tous les ans et dans tous les sites. En 2004, le rendement en grain est corrélé au taux de survie à la récolte et est inversement corrélé au nombre de poquets végétatifs par parcelle. Le taux de survie à la récolte est inversement corrélé au nombre de poquets végétatifs dans tous les sites en 2004 et à Banizoumbou et à Kodey en 2005.

D'après de Rouw et Rajot (2004), le rendement en grain reflète la combinaison de la densité de semis des plants et des composants de rendement (taux de survie à la récolte, nombre d'épis par poquet et poids des grains par épis). Notre analyse des corrélations tous sites confondus a uniquement permis de mettre en évidence le rôle du poids des grains par épi tous les ans et celui du taux de survie à la récolte en 2004.

L'analyse des corrélations par site permet d'ajouter que les rendements en grain dépendent également du nombre d'épis par poquets à Banizoumbou et à Bagoua en 2003, qu'ils dépendent du nombre d'épis par poquet et du taux de survie à Banizoumbou en 2004 et du nombre d'épis par poquet à Banizoumbou uniquement en 2005.

Tableau 12. Coefficients de corrélation de Spearman supérieurs à |0,5| et à |0,7| (en gris) en 2003, 2004 et 2005

2003	Rendement paille	Rendement grain	Indice de récolte	Poids des grains épi ⁻¹	Epis poquet ⁻¹	Talles poquet ⁻¹	Survie à la récolte*	Survie au démariage	Poquets végétatifs*	Poquets non matures*	MOV
Rendement grain	Bz, Bg, Kd, all										
Indice de récolte	Bg -	n.s.									
Poids des grains épi ⁻¹	/	Bz, Bg, Kd, all	n.s.								
Epis poquet ⁻¹	/	Bz, Bg	n.s.	n.s.							
Talles poquet ⁻¹	Bz	/	n.s.	n.s.	Bz, Bg						
Survie à la récolte*	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	Bg -	n.s.					
Survie au démariage	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	Bg -	Bg -	Bz, Bg				
Poquets végétatifs*	/	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.			
Poquets non matures*	/	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.		Bz, Bg	
2004	Rendement paille	Rendement grain	Indice de récolte	Poids des grains épi ⁻¹	Epis poquet ⁻¹	Talles poquet ⁻¹	Survie à la récolte	Survie au démariage	Poquets végétatifs	Poquets non matures	MOV
Rendement grain	Bz, Bg, Kd, all										
Indice de récolte	n.s.	Bz									
Poids des grains épi ⁻¹	/	Bg, Kd, all	n.s.								
Epis poquet ⁻¹	/	Bz	n.s.	n.s.							
Talles poquet ⁻¹	Bg	/	n.s.	n.s.	n.s.						
Survie à la récolte	Bz	Bz, all	Bz	n.s.	n.s.	n.s.					
Survie au démariage	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	Bz, Kd				
Poquets végétatifs	/	Bz -, Bg -, all -	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	Bz -, all -	n.s.			
Poquets non matures	/	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.		
MOV	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	
MOF	n.s.	Bz	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	Bg -	n.s.	n.s.	Bg
2005	Rendement paille	Rendement grain	Indice de récolte	Poids des grains épi ⁻¹	Epis poquet ⁻¹	Talles poquet ⁻¹	Survie à la récolte	Survie au démariage	Poquets végétatifs	Poquets non matures	MOV
Rendement grain	Bz, Bg, Kd, all										
Indice de récolte	n.s.	n.s.									
Poids des grains épi ⁻¹	/	Bz, Bg, all	n.s.								
Epis poquet ⁻¹	/	Bz	n.s.	n.s.							
Talles poquet ⁻¹	n.s.	/	n.s.	n.s.	n.s.						
Survie à la récolte	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.					
Survie au démariage	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.				
Poquets végétatifs	/	n.s.	n.s.	n.s.	Bz -	n.s.	Bz -, Kd -	n.s.			
Poquets non matures	/	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	all		
MOV	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	
MOF	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.

Bz = Banizoumbou ; Bg = Bagoua ; Kd = Kodey ; All = analyse tous sites confondus. Le signe (-) indique l'existence d'une corrélation négative, (n.s.) indique que le coefficient de Spearman est inférieur à |0,5| et (/) indique que la corrélation n'a pas été calculée. *Ces variables n'ont pas pu faire l'objet de corrélations à Kodey (Kd) ni tous sites confondus (All).

Remarques préliminaires importantes

Les tableaux de moyennes, d'analyse de la variance et de comparaisons multiples de moyennes sont présentés en Annexe 7. Les tableaux de comparaisons multiples donnent les probabilités que deux moyennes diffèrent au niveau de confiance $\alpha = 0,05$ et nous présentons également les s.e.d. (standard error of difference) pour les comparaisons de moyennes citées dans le texte.

Dans l'analyse ci-dessous, les effets moyens des facteurs concernent tous les sites et les effets d'un facteur sont détaillés par site uniquement lorsque l'interaction avec l'effet du site est significative. L'interaction site \times strate est presque toujours significative (à cause de la variabilité de la pluviométrie et des doses de fumier entre sites) et nous ne la détaillons que dans l'analyse des rendements. Nous n'interpréterons pas les interactions triples liées à l'effet du site. Sous la rubrique « interactions », nous détaillons les interactions liées à l'analyse par année ne faisant pas intervenir l'effet site.

Nous décrivons premièrement les résultats par année avant d'effectuer une analyse combinée et récapitulative des effets significatifs les trois années (p. 136).

Les facteurs principaux pouvant expliquer des différences significatives des paramètres de rendement ou de développement phénologique mesurés dans les différentes parcelles de l'essai sont listés ici.

➤ **facteurs contrôlés par l'essai**

- la strate de fertilité organique (p. 88)
- l'application d'engrais minéral (p. 62)
- la variété (p. 62)

Les facteurs contrôlés par l'essai sont repris avec leurs abréviations dans la fiche récapitulative.

➤ **facteurs non contrôlés mais mesurés par site**

- les propriétés physiques et chimiques initiales des sols (p. 86)
- la pluviométrie (p. 79)
- le calendrier des opérations culturales (p. 78)

➤ **facteurs non contrôlés mais pouvant être notés qualitativement**

- les maladies, les adventices et la présence de termites ou de fourmis (p. 134)

➤ **facteurs non contrôlés**

- les erreurs de mesure et les erreurs d'encodage des données

6. Analyse des rendements en mil en 2003

Remarquons que l'effet du site, l'effet de la strate de fertilité et l'interaction site × strate sont significatives pour toutes les variables (Tableau 7-1 en Annexe 7).

6.1. Taux de survie au démariage et à la récolte

Effet du site

L'effet du site est significatif ($p < 0,0001$) et le taux de survie au démariage est de 90 % à Banizoumbou, 84 % à Kodey et 73 % à Bagoua (s.e.d. = 1,4 %). Le taux plus élevé à Banizoumbou peut s'expliquer par le fait que la période sèche perturbant la phase végétative (phase 1) y soit levée avant Kodey et Bagoua (Tableau 5).

Le taux de survie à la récolte est proche de celui mesuré au démariage, il est plus élevé à Banizoumbou (87 %) qu'à Bagoua (73 %) (non mesuré à Kodey) ($p < 0,0001$).

Effet de la strate de fertilité

Les taux de survie au démariage et à la récolte sont plus importants dans les strates NF, PA02 et PA03 qu'en FT03, NF et PA01 (Tableau 13).

Les taux de survie au démariage et à la récolte sont les plus élevés dans la strate PA03 à Banizoumbou (98 % et 96 %, respectivement).

Tableau 13. Taux de survie au démariage et à la récolte en fonction des strates de fertilité (2003)

Strate	Taux de survie au démariage (%)	Taux de survie à la récolte (%)*
FT03	81	73
NF	84	78
PA01	77	78
PA02	84	86
PA03	85	85
s.e.d.	1,8	2,6
p-valeur	0,0002	<,0001

*Moyenne calculée à Bagoua et Banizoumbou uniquement

Effet de l'engrais chimique

L'effet de l'engrais sur le taux de survie est significatif uniquement lors du démariage ($p = 0,0016$). Ce taux est plus important pour les parcelles non traitées (85 %) que dans les parcelles traitées à l'engrais (80 % pour DAP et 82 % pour DAP + urée) au sein desquelles la différence n'est pas significative (s.e.d. = 1,4 %).

L'interaction site × fertilisation significative pour le taux de survie à la récolte ($p = 0,0293$) pourrait s'expliquer par le fait qu'à Banizoumbou, l'application de DAP + urée correspond aux taux de survie à la récolte le plus élevé (90 %) tandis qu'à Bagoua les parcelles témoins obtiennent les taux les plus élevés (77 %).

Effet de la variété

Les taux de survie au démariage sont influencés ($p > 0,0001$) par la variété de la façon suivante : variété ICMV (85 %) > variété Zatib (84 %) > variété locale (77 %) (s.e.d. = 1,4 %). L'interaction site \times variété significative pour le taux de survie au démariage ($p = 0,0034$) reflète qu'à Bagoua et à Banizoumbou la variété Zatib obtient un taux de survie clairement inférieur à celui de la variété ICMV.

L'effet de la variété est non significatif sur le taux de survie à la récolte, qui atteint en moyenne 80 %.

Interactions

Concernant le taux de survie au démariage, l'interaction strate \times variété est significative ($p = 0,0071$). Dans la strate PA01, nous constatons que, contrairement à l'effet moyen, la variété Zatib obtient un taux de survie au démariage inférieur à celui de la variété ICMV et similaire à celui de la variété locale (Figure 35). Aucune interaction significative n'est relevée pour le taux de survie à la récolte.

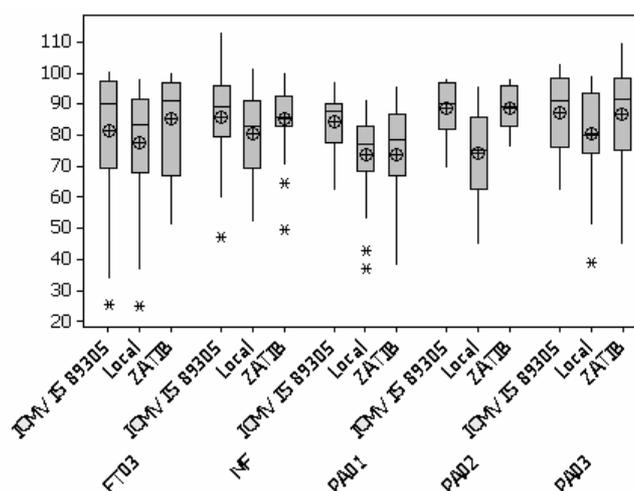


Figure 35. Graphique « boxplot^s » du taux de survie au démariage (%) illustrant l'interaction strate \times variété

^sLes graphes « boxplot » indiquent la médiane - , la moyenne \oplus et la dispersion autour de la médiane (le rectangle comprend 50 % des observations et les moustaches inférieures et supérieures comprennent les premiers et les derniers 25 % tandis que les * représentent les valeurs extrêmes).

6.2. Rendements en paille

Effet du site

Les différences sont bien marquées en ce qui concerne le rendement en paille : Banizoumbou produit 2676 kg ha^{-1} , Bagoua 2042 kg ha^{-1} et Kodey 956 kg ha^{-1} (s.e.d. = $104,4 \text{ kg ha}^{-1}$). Les plus faibles rendements à Kodey s'expliquent vraisemblablement par la plus faible pluviométrie utile sur ce site. Notons que Banizoumbou présente un grand nombre d'outliers (valeurs extrêmes).

Effet de la strate de fertilité

Les pratiques de fertilisation organique permettent d'augmenter les rendements par rapport aux parcelles non fumées ($p < 0,0001$). Le rendement moyen en paille atteint ainsi 3187 kg ha^{-1} pour la strate PA03, entre 1760 et 1820 kg ha^{-1} pour PA02, PA01 et FT03 et 890 kg ha^{-1} en moyenne pour les parcelles n'ayant pas été fumées ($\text{s.e.d.} = 134,8 \text{ kg ha}^{-1}$). Notons la grande dispersion des valeurs de rendement dans la strate PA03 comparé aux autres strates (graphe boxplot non présenté). La plus grande hétérogénéité des rendements provient sans doute du fait que la technique du parbage laisse les animaux distribuer eux-mêmes leur fumier aléatoirement dans la parcelle délimitée. Remarquons que les rendements obtenus en FT03, PA01 et PA02 ne diffèrent pas significativement les uns des autres.

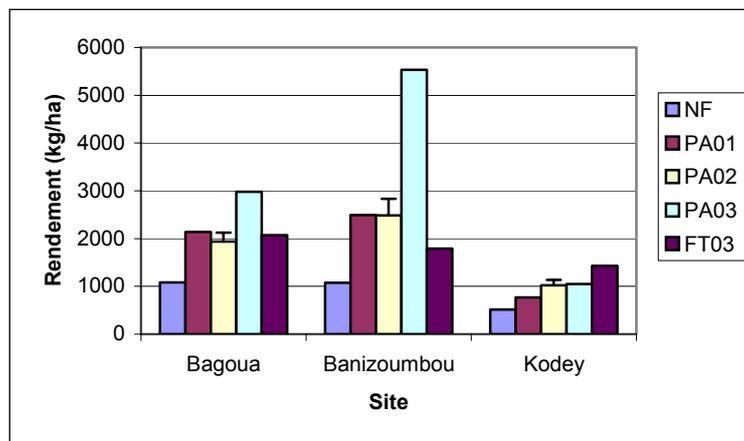


Figure 36. Rendements en paille par strate de fertilité et par site (2003)
(barres d'erreur = s.e.d. pour la comparaison des différentes strates à l'intérieur d'un site)

L'interaction strate \times site est significative ($p < 0,0001$). Excepté pour le parbage réalisé en 2003, les rendements de Banizoumbou et Bagoua sont assez proches et plus élevés que ceux de Kodey, au niveau de chaque strate de fertilité (Figure 36). Ceci reflète les quantités la pluviométrie utile dans chaque site.

Les rendements en paille des strates non fumées atteignent 1081 kg ha^{-1} à Bagoua, 1076 kg ha^{-1} à Banizoumbou et 513 kg ha^{-1} à Kodey (Figure 36). Bien que la différence entre Bagoua et Banizoumbou soit sans doute peu significative (non démontré), le fait que ces sites obtiennent des rendements plus élevés qu'à Kodey reflète que la pluviométrie utile soit la plus importante à Banizoumbou et que la strate non fumée à Bagoua bénéficie de l'effet de parages antérieurs à la mise en place de l'essai.

Le PA03 à Banizoumbou donne des rendements très élevés (5534 kg ha^{-1}) en comparaison à Bagoua (2979 kg ha^{-1}) et à Kodey (1050 kg ha^{-1}). Ceci est peut-être le reflet d'une plus grande quantité de MOF apportée en surface par le parbage, bien que la quantité résiduelle de MOF mesurée en 2004 soit identique pour Banizoumbou et Bagoua et dépassés par ceux de Kodey (Figure 31).

A Kodey uniquement, le transport de fumier donne de meilleurs rendements en paille (1427 kg ha^{-1}) que le parbage de l'année (1050 kg ha^{-1}). Ceci pourrait indiquer que les

quantités de fumier apportées par le transport de fumier aient été plus importantes que par le parcage ou que la qualité du fumier transporté aie été particulièrement élevée.

Effet de l'engrais chimique

L'effet de l'engrais sur le rendement en paille est significatif ($p = 0,0346$) mais il n'y a pas de différence entre DAP et DAP + urée. L'apport d'engrais a permis d'accroître le rendement de 222 à 251 kg ha⁻¹ par rapport au témoin (1734 kg ha⁻¹) (s.e.d = 104,4 kg ha⁻¹).

Effet de la variété

Concernant les rendements en paille, la variété locale (2208 kg ha⁻¹) l'emporte clairement sur les autres variétés ($p < 0,0001$)(s.e.d = 104,4 kg ha⁻¹). La variété Zatib et la variété ICMV montrent des rendements non statistiquement différents (1743 et 1723 kg ha⁻¹ respectivement).

Interactions

Aucune interaction significative excluant l'effet du site n'est relevée.

6.3. Nombre de talles et nombre d'épis par poquet

Effet du site

L'effet du site sur le nombre de talles par poquets est significatif ($p < 0,0001$). Le nombre moyen de talles par poquet est plus élevé à Bagoua (3,45) et Banizoumbou (3,42) qu'à Kodey (2,75) (s.e.d. = 0,113). Le nombre d'épis par poquet est légèrement plus élevé à Banizoumbou qu'à Bagoua mais cette différence n'est pas significative (il n'a pas été calculé à Kodey).

Effet de la strate de fertilité

Les nombres moyens d'épis (Tableau 15) et de talles par poquet suivent la même évolution que les rendements en paille : ils sont maximaux en PA03 et minimaux en NF. L'effet de la strate est significatif à $p < 0,0001$ pour ces deux variables.

Effet de l'engrais chimique

Les nombres de talles et d'épis par poquet sont en moyenne plus élevés pour les parcelles ayant reçu du DAP ou du DAP + urée par rapport aux témoins (Tableau 14).

Tableau 14. Nombre d'épis poquet⁻¹ et nombre de talles poquet⁻¹ par niveau de fertilisation (2003)

Fertilisation	Nombre d'épis poquet⁻¹	Nombre de talles poquet⁻¹
<i>DAP</i>	2,97	3,34
<i>DAP + urée</i>	2,94	3,25
<i>Témoin</i>	2,65	3,02
<i>s.e.d.</i>	0,112	0,113
<i>p-valeur</i>	0,0072	0,0151

Effet de la variété

L'effet de la variété n'est significatif que sur le nombre de talles par poquet ($p < 0,0001$). La variété locale possède un nombre de talles par poquet plus élevé (3,5) que ceux de Zatib (3,0) et ICMV (3,2) qui ne diffèrent pas significativement (s.e.d. = 0,113).

Interactions

Aucune interaction significative excluant l'effet du site n'est relevée.

6.4. Poids des grains par épi

Effet du site

Le poids moyen des grains par épi est plus élevé à Bagoua (35,4 g) qu'à Banizoumbou (30,7 g) et à Kodey (26,4 g) (effet du site significatif à $p < 0,0001$)(s.e.d. = 0,90 g). Rappelons que le poids des grains par épi est le produit du nombre de grains par épi, élaboré durant la phase reproductrice, et du poids moyen d'un grain, qui dépend de la phase de remplissage des grains (de Rouw et Rajot, 2004). Le poids des grains par épi faible à Kodey reflète le fait que ce site est le seul à avoir subi une période sèche en phase reproductive (Tableau 5).

Effet de la strate de fertilité

Le poids des grains par épi en fonction des strates est repris dans le Tableau 15. Celui-ci est le plus élevé dans la strate PA03 et le plus faible dans la strate non fumée. Les différences de poids des grains par épi ne sont pas significatives entre PA01, PA02 et FT03.

Effet de l'engrais chimique

Le poids des grains par épi est légèrement plus élevé dans les parcelles traitées à l'engrais (31,2 g et 30,9 g pour DAP et DAP + urée, respectivement) que dans les parcelles non traitées (30,4 g) mais l'effet de l'engrais chimique n'est pas statistiquement significatif (Tableau 16).

Effet de la variété

L'effet de la variété est significatif ($p < 0,0001$) sur le poids des grains par épi. Les poids des grains par épi les plus élevés sont notés pour la variété locale (33,5 g), suivie de la variété ICMV (30,4 g) et de la variété Zatib (28,7 g) (s.e.d. = 0,90 g).

Le poids des grains par épi est influencé significativement par la variété à Bagoua et à Banizoumbou mais pas à Kodey.

Interactions

Aucune interaction significative excluant l'effet du site n'est relevée.

6.5. Rendements en grain

Effet du site

L'effet du site est significatif ($p < 0,0001$). Banizoumbou obtient le meilleur rendement moyen en grain (813 kg ha^{-1}) tandis que Bagoua produit 693 kg ha^{-1} et Kodey 396 kg ha^{-1} (s.e.d. = $28,8 \text{ kg ha}^{-1}$). Ces résultats reflètent l'impact de la pluviométrie utile et de la période sèche subie par Kodey en phase reproductive (Tableau 5 et Figure 26). A Banizoumbou, la conjonction du taux de survie et du nombre élevé d'épis poquet¹ permet d'atteindre un rendement en grain (et en pailles associées) élevé.

Effet de la strate de fertilité

Les rendements en grain suivent presque la même évolution que les rendements en paille, l'effet du parcage de l'année est en moyenne bien marqué (971 kg ha^{-1}) par rapport aux parcelles non fumées (331 kg ha^{-1})(s.e.d. = $37,2 \text{ kg ha}^{-1}$). Les rendements obtenus en FT03, PA01 et PA02 ne diffèrent pas significativement les uns des autres ; ils valent en moyenne 622 kg ha^{-1} (Tableau 15).

Tableau 15. Paramètres de rendement et rendements en grain moyens par strate (2003)

Strate	Taux de survie à la récolte (%)	Nombre d'épis poquet ¹	Poids des grains épi ⁻¹ (g)	Rendement en grain (kg ha^{-1})	Classement
FT03	73	3,02	31,7	607	4
NF	78	1,97	25,4	332	5
PA01	78	2,89	31,7	637	2
PA02	86	2,47	31,8	623	3
PA03	85	3,9	33,7	971	1
s.e.d.	2,6	0,144	1,17	37,2	
p-valeur	0,0002	<,0001	<,0001	<,0001	

Les trois paramètres de rendement (Tableau 15) sont plus élevés dans la strate PA03 et plus faibles dans la strate non fumée, expliquant les rendements en grain obtenus. Dans les strates PA01, PA02 et FT03, le nombre d'épis par poquet compense le taux de survie à la récolte pour donner des rendements en grain similaires. L'effet de la strate sur les rendements en grain ($p < 0,0001$) se marque plus par le nombre d'épis par poquet que par le taux de survie à la récolte et le poids des grains par épi.

L'interaction strate \times site est significative ($p < 0,0001$). Les rendements en grain des non fumés sont les plus faibles et montrent la même tendance que les rendements en paille (424 kg ha^{-1} à Bagoua, 389 kg ha^{-1} à Banizoumbou et 181 kg ha^{-1} à Kodey) (Figure 37). Notons que les rendements à Banizoumbou et à Bagoua sont très semblables, à l'exception des strates PA03 et PA02.

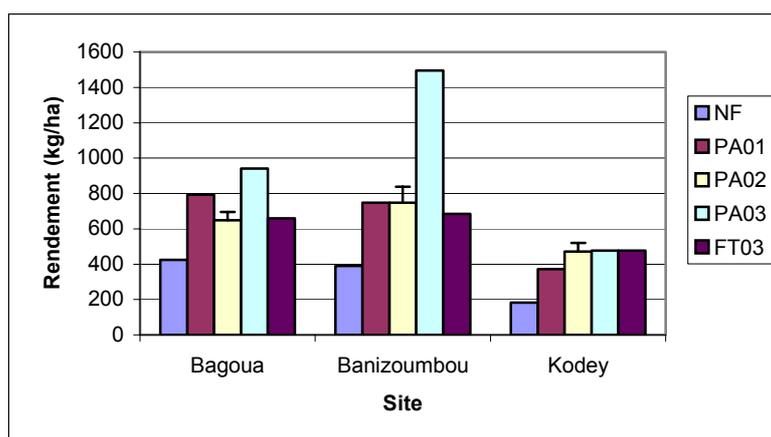


Figure 37. Rendements en grain par site et par strate de fertilité (2003)
(barres d'erreur = s.e.d. pour la comparaison des différentes strates à l'intérieur d'un site)

La strate PA03 fournit les meilleurs rendements en grain sauf à Kodey où les strates FT03, PA03 et PA02 donnent des rendements en grain identiques (477 kg ha^{-1}). Les rendements en grain en PA03 à Banizoumbou (1495 kg ha^{-1}) dépassent ceux de Bagoua (941 kg ha^{-1}). Tout comme nous l'avons remarqué pour les rendements en paille, le rendement en grain élevé obtenu à Banizoumbou dans la strate PA03 permet au rendement moyen de ce site de dépasser celui des autres.

Les strates PA02 et FT03 fournissent toujours des rendements similaires.

La strate PA01 à Bagoua donne un rendement en grain supérieur à celui de la strate PA02 ($p = 0,0026$), ce qui provient d'un nombre d'épis par poquet et d'un taux de survie à la récolte également plus élevés en PA01 qu'en PA02. Ceci pourrait être attribué à une quantité de fumier supérieure ou de meilleure qualité appliquée en 2001. A Kodey, le rendement en grain de la strate PA02 est significativement plus élevé que celui de la strate PA01 tandis que cette différence n'est pas significative à Banizoumbou.

A Bagoua dans la strate FT03, le faible taux de survie à la récolte (58 %) n'est que partiellement compensé par le nombre d'épis par poquet (3,4), et le rendement en grain obtenu y est inférieur à celui de PA01. Il faut aussi remarquer que le poids des grains par épi y est plus faible en FT03 qu'en PA01 (Tableau 7-2 en Annexe 7).

Effet de l'engrais chimique

Les rendements en grain sont plus faibles dans les parcelles non traitées par engrais (Tableau 16). Les rendements ne diffèrent pas significativement entre applications de DAP et de DAP + urée.

Tableau 16. Paramètres de rendement et rendement en grain moyens par niveau de fertilisation (2003)

Niveau de fertilisation	Taux de survie à la récolte (%)	Nombre d'épis poquet ⁻¹	Poids des grains épi ⁻¹ (g)	Rendement en grain (kg ha^{-1})
DAP	79	2,97	31,2	654
DAP + urée	80	2,94	31,0	665
Témoin	81	2,65	30,3	583
s.e.d.	2,0	0,112	0,90	28,8
p-valeur	n.s.	0,0072	n.s.	0,0098

Effet de la variété

L'effet de la variété est significatif sur les rendements en grains ($p = 0,0038$). La séquence est la suivante : ICMV (673 kg ha^{-1}) > Local (650 kg ha^{-1}) > Zatib (579 kg ha^{-1}) (s.e.d. = $28,8 \text{ kg ha}^{-1}$). La comparaison des rendements moyens entre variétés locale et ICMV n'est pas significative.

Interactions

Aucune interaction significative excluant l'effet du site n'est relevée.

6.6. Indice de récolte

Effet de la variété

L'effet des variétés améliorées sur l'indice de récolte apparaît clairement ($p < 0,0001$). Les indices de récolte moyens pour les variétés ICMV (26,9 %) et Zatib (23,5 %) dépassent celui de la variété locale (21,1 %) (s.e.d. = 0,54 %).

L'interaction site \times variété ($p = 0,0005$) trahit le fait qu'à Banizoumbou l'indice de récolte de la variété Zatib ne diffère pas de celui de la variété locale.

Les effets autres que concernant la variété n'ont pas été analysés.

6.7. Nombres de poquets végétatifs et non matures par parcelle

Effet du site

Le nombre de poquets végétatifs par parcelle est globalement très faible et ne paraît pas lié au site (0,6 à Bagoua et 0,7 à Banizoumbou). En moyenne, le nombre de poquets non matures par parcelle est également très faible. Il est plus faible à Bagoua (0,3) qu'à Banizoumbou (0,6). L'analyse de variance sur ces variables n'a pas été effectuée pour des raisons de non normalité.

Effet de la strate de fertilité

Le Tableau 17 indique que le nombre de poquets végétatifs et non matures est plus élevé dans les parcelles non fumées. Ces nombres tendent vers 0 dans les parcelles récemment fumées.

Tableau 17. Nombres de poquets végétatifs et non matures par strate de fertilité (2003)

Strate	Poquets végétatifs *	Poquets non matures *
FT03	0,00	0,19
NF	2,87	1,61
PA01	0,02	0,11
PA02	0,30	0,43
PA03	0,00	0,02

*Moyenne calculée à Bagoua et Banizoumbou uniquement

Effet de l'engrais chimique

Le Tableau 18 indique que les nombres de poquets végétatifs et non matures sont plus importants dans les parcelles non traitées par engrais.

Tableau 18. Nombres de poquets végétatifs et de poquets non matures par niveau de fertilisation et par variété (2003)

	Poquets végétatifs	Poquets non matures
<i>DAP</i>	0,12	0,13
<i>DAP + urée</i>	0,12	0,23
<i>Témoin</i>	1,67	1,04
<i>ICMV IS 893</i>	0,47	0,28
<i>Locale</i>	0,70	0,58
<i>ZATIB</i>	0,74	0,56

Effet de la variété

Les nombres de poquets non matures et végétatifs sont en moyenne très faibles et légèrement plus faibles pour la variété ICMV que pour les autres variétés (Tableau 18). Ceci pourrait éventuellement être expliqué par le fait que la variété ICMV est résistante aux insectes foreurs de tige, qui, s'ils sont présents, peuvent perturber l'initiation de la panicule (et générer des poquets végétatifs ou non matures). Notons ici que les nombres de poquets végétatifs et non matures ne peuvent pas être reliés aux nombres de poquets atteints par le champignon mildiou car ceux-ci sont comptés dans les poquets récoltés ou dans les poquets non matures en fonction du nombre d'épis atteints et de la sévérité de l'infection.

7. Analyse des rendements en mil en 2004

Comme en 2003, remarquons que l'effet du site (excepté pour le nombre d'épis par poquet), l'effet de la strate de fertilité et l'interaction site × strate sont significatives pour toutes les variables (Tableau 7-4 en Annexe 7).

Le Tableau 19 compare les variables mesurées par site par rapport à 2003. Nous remarquons que la valeur de la plupart de ces variables diminue à Banizoumbou ou augmente très faiblement en comparaison des autres sites. Rappelons que Banizoumbou a été semé tardivement et que contrairement à 2003 ce site bénéficie de la pluviométrie utile la plus faible. Kodey profite de la pluviométrie utile la plus élevée.

Tableau 19. Comparaison des variables mesurées par rapport à 2003

	Site	2004 (% 2003)	Différence (%)
Rendement en paille	<i>Bagoua</i>	73,2	-26,8
	<i>Banizoumbou</i>	27,7	-72,3
	<i>Kodey</i>	161,0	61,0
Rendement en grain	<i>Bagoua</i>	115,8	15,8
	<i>Banizoumbou</i>	70,3	-29,7
	<i>Kodey</i>	165,3	65,3
Indice de récolte	<i>Bagoua</i>	129,2	29,2
	<i>Bani</i>	155,6	55,6
	<i>Kodey</i>	103,0	3,0
Poids grains épi⁻¹	<i>Bagoua</i>	106,6	6,6
	<i>Banizoumbou</i>	95,8	-4,2
	<i>Kodey</i>	131,3	31,3
Nombre d'épis poquet¹	<i>Bagoua</i>	109,9	9,9
	<i>Banizoumbou</i>	102,4	2,4
	<i>Kodey</i>	/	/
Nombre de talles poquet¹	<i>Bagoua</i>	110,7	10,7
	<i>Banizoumbou</i>	102,9	2,9
	<i>Kodey</i>	166,1	66,1
Taux de survie à la récolte	<i>Bagoua</i>	96,8	-3,2
	<i>Banizoumbou</i>	67,8	-32,2
	<i>Kodey</i>	/	/
Taux de survie au démariage	<i>Bagoua</i>	120,3	20,3
	<i>Banizoumbou</i>	102,5	2,5
	<i>Kodey</i>	87,3	-12,7

Effet de l'année significatif à $p < 0,0001$ pour chaque variable

7.1. Taux de survie au démariage et à la récolte

Effet du site

Le taux de survie moyen au démariage est différent selon les sites ($p < 0,001$). Il vaut 73,0 % à Kodey, 88,0 % à Bagoua et 92,1 % à Banizoumbou (s.e.d. = 1,2 %). Il reflète les périodes sèches subies après le semis à Kodey et dans la strate PA03 à Bagoua (seule strate non ressemée). Le taux de survie au démariage est supérieur à celui de 2003 excepté à Kodey (Tableau 19).

L'effet du site est significatif sur le taux de survie à la récolte ($p < 0,0001$). Le taux de survie moyen vaut 70,5 % à Bagoua, 63,9 % à Kodey et 59,4 % à Banizoumbou (s.e.d. = 1,7 %).

Notons que par rapport au taux de survie au démariage, le taux de survie à la récolte représente une baisse de 9,1 % à Kodey, 17,5 % à Bagoua et 32,3 % à Banizoumbou. La différence entre taux de survie au démariage et à la récolte est liée à la pluviométrie utile, plus faible à Banizoumbou. Dans ce site, le taux de survie à la récolte a diminué de plus de 30 % par rapport à 2003 (Tableau 19).

Effet de la strate de fertilité

L'effet de la strate de fertilité sur les taux de survie est significatif ($p < 0,0001$). Le taux de survie au démariage suit la séquence suivante : FT03 > PA04 > NF > PA02 > PA03 > FT04. Le taux de survie à la récolte suit une autre séquence : PA04 > FT03 > FT04 > PA03 > PA02 > NF. Comme en 2003, celui-ci est le plus élevé pour le parage de l'année et le plus faible pour les parcelles non fumées.

L'effet bénéfique de la fumure sur le taux de survie à la récolte est attribué à une croissance initiale des feuilles plus rapide, ce qui permet une interception des radiations plus efficace, un développement racinaire rapide et un meilleur accès à l'eau. Michels et Biolders (2006) ont montré que l'application de fumier et d'urine permettait d'augmenter la densité racinaire et la profondeur d'enracinement par rapport à des parcelles non fumées.

En général, le taux de survie au démariage est plus faible à Kodey et il diminue avec le niveau de fumure. L'interaction site \times strate significative ($p < 0,0001$) s'explique entre autres par le fait que, contrairement à l'effet moyen du site, les taux de survie au démariage observés à Bagoua sont les plus élevés dans toutes les strates, sauf en FT04 et PA03, où ils sont les plus faibles (64 et 69 %). Le faible taux de survie au démariage dans la strate PA03 provient vraisemblablement du fait que cette strate est la seule à ne pas avoir été ressemée à Bagoua et qu'elle a subi une période sèche de 31 jours après semis.

Au niveau du taux de survie à la récolte, remarquons qu'il est particulièrement faible à Banizoumbou dans la strate NF (19 %) mais que les taux de survie en FT04 (80,6 %) et PA04 (87,6 %) dépassent malgré tout ceux enregistrés à Kodey et à Bagoua. Comme la différence se situe au niveau des parcelles fumées dans l'année (PA04 et FT04), l'effet sur les rendements est important et peut expliquer que les rendements en grain dans ces strates soient plus élevés à Banizoumbou qu'à Kodey.

Effet de l'engrais chimique

Comme en 2003, le taux de survie au démariage est plus important pour les parcelles témoin que pour les parcelles fertilisées (Tableau 20). Au contraire, le taux de survie à la récolte est plus faible pour les parcelles non traitées à l'engrais.

Tableau 20. Taux de survie au démariage et à la récolte par niveau de fertilisation (2004)

Fertilisation	Taux de survie au démariage (%)	Taux de survie à la récolte (%)
<i>DAP</i>	82	67
<i>DAP + urée</i>	83	67
<i>Témoin</i>	88	59
<i>s.e.d.</i>	1,2	1,7
<i>p-valeur</i>	< 0,0001	< 0,0001

L'effet de l'engrais chimique sur le taux de survie au démarrage n'est pas significatif à Bagoua ni à Banizoumbou et l'effet sur le taux de survie à la récolte n'est pas significatif à Bagoua.

L'interaction site × fertilisation est significative ($p < 0,0001$) pour les deux taux de survie. A Banizoumbou et à Bagoua, le taux de survie au démarrage ne diffère pas entre les parcelles témoins et les parcelles où l'engrais a été appliqué. Contrairement à Kodey, ces sites ont été semés en retard et n'ont, à aucun moment, souffert de périodes sèches qui auraient pu brûler les plantules où l'engrais a été appliqué. Le taux de survie à la récolte est partout plus faible pour les parcelles non fertilisées, excepté à Kodey où les témoins montrent des taux de survie de 69 % contre 63 % et 60 % pour DAP et DAP + urée, respectivement. Dans ce site, les taux de survie à la récolte reflètent les taux de survie au démarrage.

Effet de la variété

Comme en 2003, les taux de survie au démarrage est influencé par la variété ($p < 0,0001$) de la façon suivante : variété ICMV (88 %) = variété Zatib (86 %) > variété locale (79 %) (s.e.d. = 1,2 %).

Contrairement à 2003, l'effet de la variété est significatif sur le taux de survie à la récolte ($p < 0,0001$). Le taux de survie à la récolte vaut 72, 67 et 54 % pour les variétés ICMV, Zatib et locale, respectivement (s.e.d. = 1,7 %).

L'interaction significative site × variété ($p < 0,0001$) pour le taux de survie au démarrage reflète le fait que celui-ci ne soit pas différent selon les variétés à Bagoua.

Interactions

Nous relevons l'existence de l'interaction strate × variété ($p = 0,0170$) et de l'interaction triple strate × fertilisation × variété ($p = 0,0120$) pour le taux de survie au démarrage. La première interaction s'explique par le fait la variété Zatib obtient un meilleur taux de survie au démarrage que la variété ICMV dans les strates FT03 et FT04 (Figure 38). L'interaction triple est difficile à interpréter, elle est illustrée dans la Figure 39.

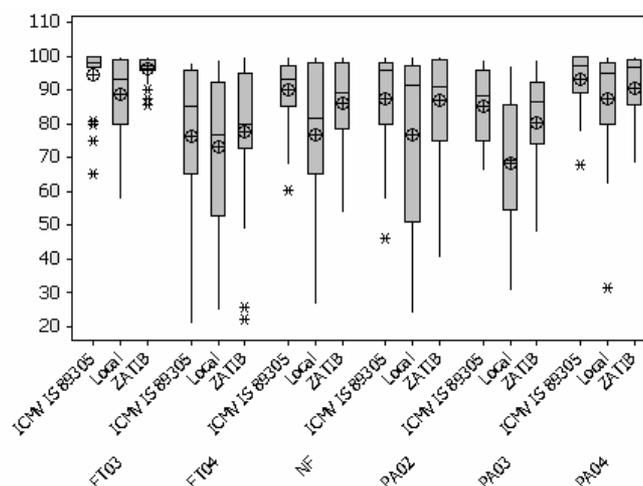


Figure 38. Graphe « boxplot » du taux de survie au démarrage (%) illustrant l'interaction strate x variété

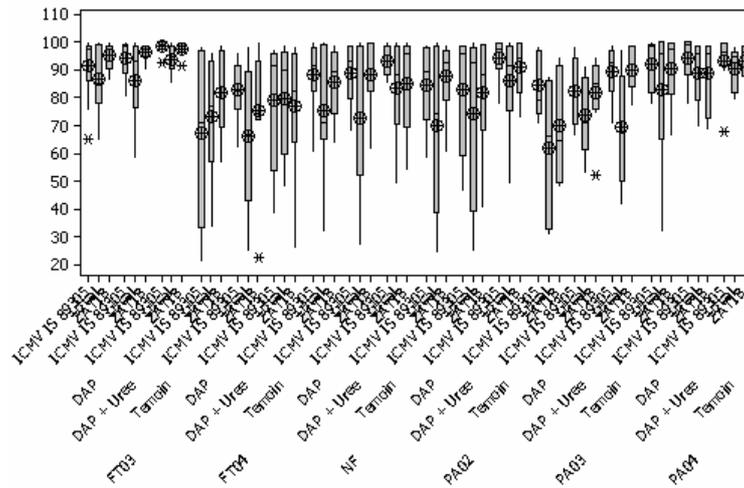


Figure 39. Graphe « boxplot » du taux de survie au démaillage (%) illustrant l'interaction strate x fertilisation x variété

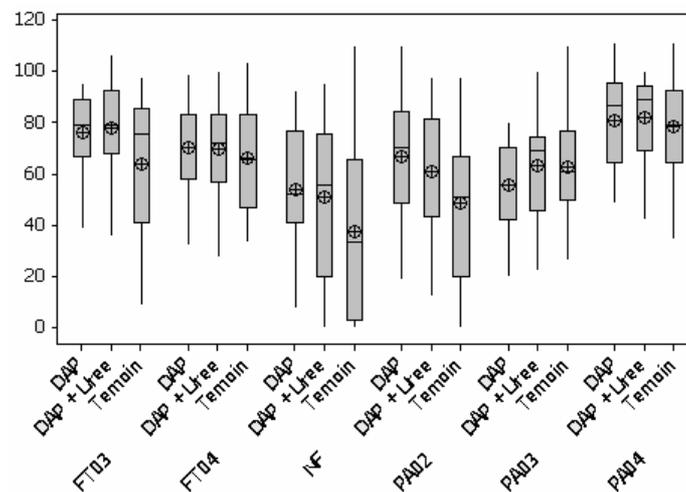


Figure 40. Graphe « boxplot » du taux de survie à la récolte (%) illustrant l'interaction strate x fertilisation

Le taux de survie à la récolte montre l'interaction strate × fertilisation significative ($p = 0,0032$). Nous observons que, contrairement aux autres strates, les parcelles non traitées par engrais dans les strates PA03, PA04 et FT04 ont un taux de survie similaire voire supérieur à celles traitées par engrais (Figure 40). Dans ces strates de fumure récente, la distribution spatiale peu homogène du fumier apporté pourrait avoir masqué l'effet de l'application d'engrais. D'autre part, dans les strates PA02 et NF, l'application de DAP + urée ne permet pas d'obtenir des taux de survie équivalents à ceux fournis par l'application de DAP seul. Ceci pourrait refléter le fait que l'ajout d'urée peut occasionner des brûlures chimiques aux plantules qui sont d'autant plus dommageables dans les parcelles les moins fumées, où les plantules sont plus fragiles.

7.2. Rendements en paille

Effet du site

L'effet du site est significatif ($p < 0,0001$). Kodey produit 1539, Bagoua 1494 kg ha⁻¹ et Banizoumbou 742 kg ha⁻¹ seulement (s.e.d. = 53,2 kg ha⁻¹). La différence entre Bagoua et Kodey n'est pas significative. Par rapport à 2003, on note une diminution du rendement en paille de 27 % à Bagoua et de 73 % à Banizoumbou. Les rendements en paille augmentent de 61 % à Kodey par rapport à l'année précédente (Tableau 19). Ces résultats reflètent l'impact de la pluviométrie utile particulièrement importante à Kodey et la plus faible à Banizoumbou en 2004 (Figure 26).

Effet de la strate de fertilité

Les pratiques de fertilisation organique permettent d'augmenter les rendements en paille par rapport aux parcelles non fumées ($p < 0,0001$). Le rendement moyen en paille atteint 1640 kg ha⁻¹ pour PA04, 1476 kg ha⁻¹ pour FT04, 1413 kg ha⁻¹ pour PA03, 1403 kg ha⁻¹ pour le FT03, 924 kg ha⁻¹ pour PA02 et 694 kg ha⁻¹ pour NF (s.e.d. = 75,2 kg ha⁻¹). Les comparaisons concernant FT03, FT04 et PA03 sont les seules à ne pas être significatives.

Nous remarquons qu'au niveau du parage de l'année, le rendement en 2004 vaut la moitié de celui de 2003. Le parage de l'année donne les rendements les plus élevés en moyenne mais contrairement à 2003, les effets résiduels des parages antérieurs sont en 2004 supplantés par l'effet du fumier transporté de l'année.

La baisse des rendements moyens de 2003 à 2004 peut être due aux quantités de fumier apportées au champ (non vérifiable en 2003), à la pluviométrie (plus faible à Bagoua et Banizoumbou qu'en 2003 mais il existe des différences dans les périodes sèches) ou à la longueur du cycle cultural (plus faible en 2004). Etant donné que cette diminution du rendement en paille a lieu aussi pour les parcelles non fumées, on ne peut pas exclure les deux dernières hypothèses.

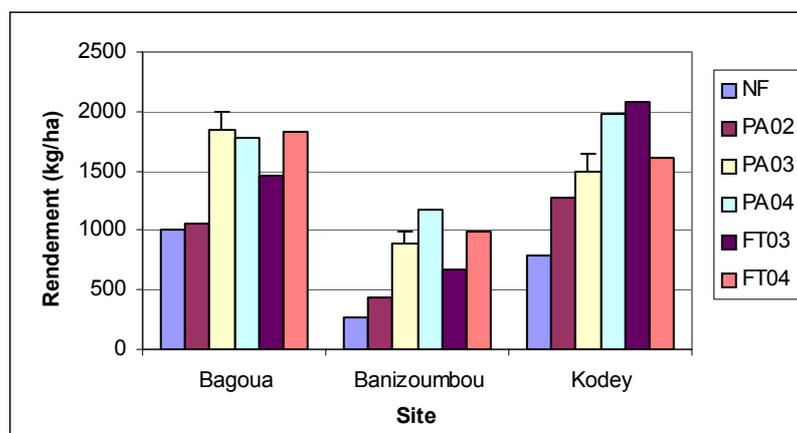


Figure 41. Rendements en paille par strate de fertilité et par site (2004)
(barres d'erreur = s.e.d. pour la comparaison des différentes strates à l'intérieur d'un site)

L'interaction site \times strate est significative ($p < 0,0001$). L'analyse des rendements en paille par site (Figure 41) permet de mettre en évidence que les meilleurs rendements en paille sont obtenus dans les strates FT03 (2079 kg ha⁻¹) et PA04 (1981 kg ha⁻¹) à Kodey. Le rendement en paille des strates NF sont les plus faibles, ils valent 1001 kg ha⁻¹ à Bagoua, 787 kg ha⁻¹ à Kodey et 262 kg ha⁻¹ à Banizoumbou.

Remarquons que les rendements augmentent selon la séquence NF < PA02 < PA03 < PA04, excepté à Bagoua où les strates PA03 et PA04 donnent des rendements en paille non significativement différents.

Au niveau du transport de fumier, les rendements en paille augmentent dans l'ordre NF < FT03 < FT04, excepté à Kodey où le rendement de la strate FT03 dépasse celui de la strate FT04. Nous observons que le meilleur rendement en paille de la strate FT04 est obtenu à Bagoua (1832 kg ha⁻¹) là où la MOF résiduelle mesurée était la plus élevée.

Les rendements des strates fumées dans l'année (FT04 et PA04) ne diffèrent qu'à Kodey. Remarquons que les rendements de la strate PA04, tout comme la pluviométrie utile, décroissent dans l'ordre Kodey > Bagoua > Banizoumbou tandis que la MOF résiduelle décroît dans le sens Banizoumbou > Kodey > Bagoua (Figure 31). L'effet du parage de l'année paraît donc conditionné plus par la pluviométrie que par les quantités de fumier résiduelles mesurées.

L'apport de matière organique végétale au sol (Figure 32) était particulièrement élevé à Banizoumbou dans la strate FT04, mais on ne remarque pas d'effet sur les rendements en paille qui y sont les plus faibles pour cette strate. Ceci pourrait éventuellement s'expliquer par le fait que le rapport C/N du fumier transporté en 2004 (qui comporte une grande part de déchets végétaux et ménagers) y soit inférieur à celui des autres sites, favorisant ainsi l'immobilisation de N par les microorganismes. D'autre part, Banizoumbou a bénéficié de la pluviométrie utile la plus faible.

Effet de l'engrais chimique

L'effet de l'engrais est significatif ($p < 0,0001$). Les rendements moyens sont légèrement plus élevés lors de l'application de DAP + urée (1369 kg ha⁻¹) et de DAP seul (1323 kg ha⁻¹) que sans application d'engrais (1088 kg ha⁻¹). La différence entre DAP et DAP + urée n'est pas significative (s.e.d. = 53,2 kg ha⁻¹).

Effet de la variété

L'effet moyen de la variété est significatif ($p = 0,0026$) et les rendements en paille sont les suivants : 1315 kg ha⁻¹ pour la variété ICMV, 1312 kg ha⁻¹ pour la variété locale et 1155 kg ha⁻¹ pour la variété Zatib. La variété locale ne donne pas les meilleurs rendements comme en 2003, mais la différence de rendement entre variété locale et ICMV n'est pas significative (s.e.d. = 53,2 kg ha⁻¹).

L'interaction site \times variété ($p = 0,0031$) s'explique par le fait que contrairement aux autres sites, la variété locale permet d'obtenir le rendement le plus élevé à Bagoua (1721 kg ha⁻¹).

Interactions

L'interaction strate × fertilisation significative ($p = 0,0361$) indique que l'effet de l'engrais chimique n'est pas le même selon les strates de fertilité. La Figure 42 indique que dans les strates FT04, NF et PA02, le rendement des parcelles traitées par application de DAP + urée est inférieur à celui des parcelles traitées par DAP. Cette tendance est inversée dans les strates PA03 et PA04 (et FT03, dans une moindre mesure). Il semble que l'ajout d'urée ne montre un effet bénéfique sur le rendement en paille que sur les parcelles ayant bénéficié d'un apport récent en fumure organique. Il n'y a pas de réponse aux fertilisants azotés sans correction préalable de la déficience phosphatée (Buerkert et al., 2002) et l'apport de fumier dans ces strates (PA03 et PA04) a peut-être permis de corriger en partie la déficience en P du sol que le DAP n'aurait pas permis de corriger. Notons également que dans les strates PA04, PA03 et FT03, les parcelles témoins obtiennent des rendements similaires à ceux des parcelles traitées par DAP. La distribution spatiale peu homogène du fumier et l'effet important de celui-ci sur les rendements pourraient avoir masqué l'effet de l'application d'engrais.

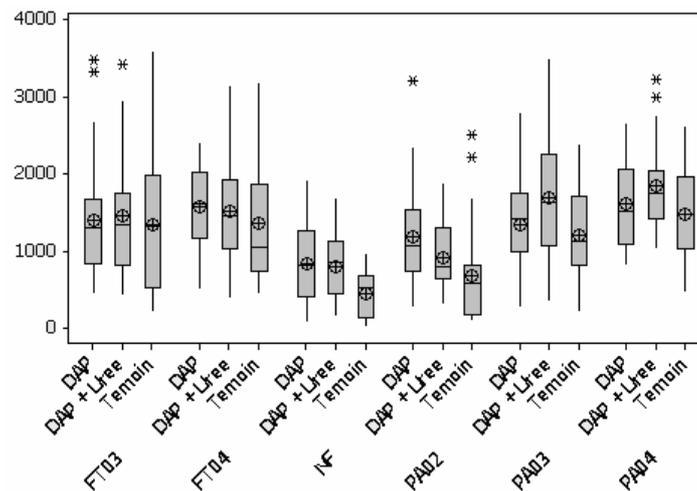


Figure 42. Graphique « boxplot » du rendement en paille (kg ha^{-1}) illustrant l'interaction strate x fertilisation

7.3. Nombre de talles et nombre d'épis par poquet

Effet du site

L'effet du site sur le nombre d'épis par poquet n'est pas significatif. L'effet du site se marque sur le nombre de talles par poquet ($p > 0,0001$) : il est plus élevé à Kodey (4,6) qu'à Bagoua (3,8) et à Banizoumbou (3,5) (s.e.d. = 0,12). Notons que le nombre de talles par poquet augmente de 66 % par rapport à 2003 à Kodey. Le tallage supérieur à Kodey peut être mis en relation avec les meilleurs rendements en paille obtenus dans ce site. Il pourrait avoir été favorisé par une pluviométrie utile et une durée de cycle cultural supérieures à celles des autres sites. Les deux périodes sèches à Kodey pendant la phase végétative n'ont visiblement pas eu d'impact sur le nombre de talles par poquet.

Effet de la strate de fertilité

Contrairement à 2003, le nombre moyen de talles par poquet ne suit pas la même évolution que les rendements en paille : FT04 > PA03 > PA04 > PA02 > FT03 > NF . Le nombre moyen d'épis par poquet diminue selon la séquence suivante : PA03 > PA04 > FT04 > FT03 > PA02 > NF (Tableau 21).

Tableau 21. Nombre de talles et d'épis par poquet par strate de fertilité (2004)

Strate	Nombre de talles poquet⁻¹	Nombre d'épis poquet⁻¹
<i>FT03</i>	3,74	3,02
<i>FT04</i>	4,51	3,08
<i>NF</i>	3,29	2,63
<i>PA02</i>	3,89	2,74
<i>PA03</i>	4,40	3,67
<i>PA04</i>	3,97	3,32
<i>s.e.d.</i>	0,173	0,155
<i>p-valeur</i>	< 0,0001	< 0,0001

Effet de l'engrais chimique

Les effets de l'engrais chimique sur les nombres de talles et d'épis par poquet sont significatifs (Tableau 22). Dans les deux cas, il n'y a pas de différence significative entre DAP et DAP + urée.

Tableau 22. Nombre de talles et d'épis par poquet par niveau de fertilisation (2004)

Fertilisation	Nombre de talles poquet⁻¹	Nombre d'épis poquet⁻¹
<i>DAP</i>	4,02	3,23
<i>DAP + urée</i>	4,09	3,22
<i>Témoin</i>	3,79	2,79
<i>s.e.d.</i>	0,122	0,109
<i>p-valeur</i>	0,00442	0,0002

Effet de la variété

L'effet de la variété sur le nombre de talles par poquet est significatif ($p < 0,0001$). Comme en 2003, celui-ci est plus élevé pour la variété locale (4,3) que pour les variétés améliorées (3,8 pour ICMV et 3,7 pour Zatib, *s.e.d.* = 0,122). L'interaction site \times variété ($p < 0,0001$) est expliquée par le fait qu'à Banizoumbou le nombre de talles par poquet ne soit pas différent selon les variétés.

Le nombre d'épis par poquet est plus élevé pour la variété ICMV mais l'effet de la variété est non significatif.

Interactions

Aucune interaction significative excluant l'effet du site n'est relevée.

7.4. Poids des grains par épi

Effet du site

L'effet du site est significatif ($p < 0,0001$). Le poids des grains par épi est plus faible à Banizoumbou (29,5 g) qu'à Kodey (34,7 g) et Bagoua (37,7 g)(s.e.d. = 0,85 g). Ce poids augmente de 7 % à Bagoua et de 31 % à Kodey par rapport à l'année précédente (Tableau 19).

Le fait que le poids des grains soit plus élevé à Bagoua qu'à Kodey malgré que la pluviométrie utile y soit inférieure pourrait s'expliquer par un mécanisme compensatoire : la fertilité suffisante du site de Bagoua (parcages antérieurs à l'essai) permet au poids des grains par épi de compenser partiellement le nombre de talles par poquet (inférieur par rapport à Kodey). Kodey a connu en outre des périodes sèches dans les 3 phases de développement, y compris dans la phase de remplissage des grains (Tableau 6).

Effet de la strate de fertilité

L'effet de la strate de fertilité sur le poids des grains par épi est significatif (Tableau 24). Le poids des grains par épi est plus élevé dans les strates FT04 et PA04 et le plus faible dans la strate NF.

Effet de l'engrais chimique

Le poids des grains par épi est en moyenne plus élevé dans les parcelles traitées par application d'engrais (Tableau 23). L'interaction site \times fertilisation est significative ($p = 0,0046$). L'effet de l'engrais chimique sur le poids des grains par épi n'est visible qu'à Kodey. Ceci pourrait refléter que, ayant été semés en retard, Banizoumbou et Bagoua n'aient pas pu profiter du flux de N libéré lors des premières pluies (Bationo et Vlek, 1997) et aient utilisé tous les nutriments apportés par l'engrais à accroître le nombre d'épis par poquet (paramètre fixé lors de la première moitié du cycle de croissance). D'après l'étude menée par de Rouw (2004), le poids des grains par épi influencé par la fertilisation à Kodey indiquerait que celle-ci a permis de fournir des nutriments sur une longue période, jusqu'à la deuxième moitié du cycle.

Tableau 23. Poids des grains par épis par niveau de fertilisation (2004)

Fertilisation	Poids des grains épi ⁻¹ (g)
DAP	34,7
DAP + urée	34,6
Témoin	32,7
s.e.d.	0,85
p-valeur	0,0061

Effet de la variété

L'effet de la variété se marque sur le poids des grains par épi ($p < 0,0001$). Comme en 2003, il est plus élevé pour la variété locale (36,2 g) que pour les variétés améliorées (33,1 et 32,7 g pour ICMV et Zatib, respectivement)(s.e.d. = 0,85 g). L'interaction site \times variété ($p = 0,0003$) s'explique par le fait que l'effet de la sur le poids des grains par épi n'est visible qu'à Bagoua.

Interactions

Aucune interaction significative excluant l'effet du site n'est relevée.

7.5. Rendements en grain

Effet du site

L'effet du site est significatif ($p < 0,0001$). Les rendements en grains montrent une tendance différente des rendements en paille : Bagoua (802 kg ha^{-1}) produit plus que Kodey (654 kg ha^{-1}) et Banizoumbou (571 kg ha^{-1}) (s.e.d. = $24,4 \text{ kg ha}^{-1}$).

Rappelons qu'en 2003 les rendements étaient classés de la façon suivante: Banizoumbou > Bagoua > Kodey. Par rapport à 2003, les rendements en grain augmentent de 16 % à Bagoua et de 65 % à Kodey tandis qu'ils diminuent de 30 % à Banizoumbou (Tableau 19).

Les poids des grains par épi et les taux de survie à la récolte sont plus élevés à Bagoua que dans les autres sites et expliquent les bons rendements en grain observés.

Effet de la strate de fertilité

Les rendements en grain suivent la même évolution que les rendements en paille : l'effet du parcage de l'année est également bien marqué (976 kg ha^{-1}) contre le faible rendement des parcelles non fumées (341 kg ha^{-1}). Contrairement à 2003, les effets des parcages des années antérieures sont supplantés par l'effet du fumier transporté de l'année (Tableau 24). Ces différences entre les rendements de 2003 et 2004 peuvent être expliquées de la même manière que les différences de rendements en paille (point 7.2).

Les trois paramètres de rendement sont plus élevés dans la strate PA04 et plus faibles dans la strate non fumée (Tableau 24), expliquant les rendements en grain obtenus. Dans la strate PA03, le nombre élevé d'épis par poquet permet de compenser le taux de survie à la récolte et le poids des grains par épi pour donner des rendements en grain similaires à ceux de la strate FT04.

Tableau 24. Paramètres de rendement et rendements en grain moyens par strate (2004)

Strate	Taux de survie à la récolte (%)	Nombre d'épis poquet ⁻¹	Poids des grains épi ⁻¹ (g)	Rendement en grain (kg ha^{-1})	Classement
FT03	72	3,02	32,2	696	4
FT04	68	3,08	37,1	748	2
NF	47	2,63	26,5	342	6
PA02	59	2,74	34,6	547	5
PA03	60	3,67	35,8	733	3
PA04	80	3,32	37,4	976	1
s.e.d.	2,5	0,155	1,21	34,7	
p-valeur	<0,0001	<0,0001	<0,0001	<0,0001	

L'interaction site \times strate est significative ($p < 0,0001$). La Figure 43 indique l'évolution des rendements en fonction des strates de fertilité est la similaire dans les trois

sites, à l'exception du rendement de la strate FT04 dépassant celui de la strate FT03 uniquement à Banizoumbou.

Les rendements en grain des strates NF sont systématiquement les plus faibles et valent 506 kg ha⁻¹ à Bagoua, 332 kg ha⁻¹ à Kodey et 152 kg ha⁻¹ à Banizoumbou.

Les rendements en grain à Bagoua sont en moyenne plus élevés (dans toutes les strates à l'exception de FT04) que ceux de Kodey et Banizoumbou. Le meilleur rendement en grain sur tous les sites a lieu à Bagoua en PA04 (1158 kg ha⁻¹) alors que, paradoxalement, ce PA04 est celui sur lequel on a mesuré le moins de MOF résiduelle en 2004 (Figure 31), ce qui signifie que les apports en fumier ont été plus faibles ou que la décomposition a été plus rapide. Les rendements les plus élevés dans la strate PA03 sont obtenus à Bagoua. Le nombre d'épis par poquet (4,0) et le poids des grains par épi (44,3 g) y sont les plus élevés et ont compensé le faible taux de survie à la récolte (56,4 %) expliqué par la sécheresse après semis dans cette strate.

A l'inverse du rendement en paille, le rendement en grain dans la strate FT04 est plus élevé à Banizoumbou (764 kg ha⁻¹) qu'à Bagoua (755 kg ha⁻¹) et Kodey (723 kg ha⁻¹) tandis que la MOF résiduelle décroît dans le sens Bagoua > Kodey > Banizoumbou (Figure 31). Ce rendement élevé à Banizoumbou est expliqué par un taux de survie à la récolte particulièrement important (80,6 %) dont nous n'expliquons pas la provenance.

La strate PA04 à Banizoumbou donne un rendement en grain de 957 kg ha⁻¹ alors que 1158 kg ha⁻¹ sont obtenus à Bagoua malgré un apport résiduel en fumier très inférieur. Ceci est expliqué par le fait que la pluviométrie aie été plus importante à Bagoua et plus d'éléments nutritifs étaient présents dans le sol (provenant d'une décomposition rapide du fumier du parcage de l'année ou de parcages antérieurs à l'essai).

La MOV résiduelle était particulièrement élevée à Banizoumbou en FT04 (Figure 32) mais le rendement en grain dans cette strate y est le plus faible de tous les sites. La même remarque avait été effectuée dans l'analyse du rendement en paille et il ne semble donc pas que la couverture du sol par la matière végétale aie un effet bénéfique dans ce site bien qu'une pluviométrie défavorable soit à prendre également en compte.

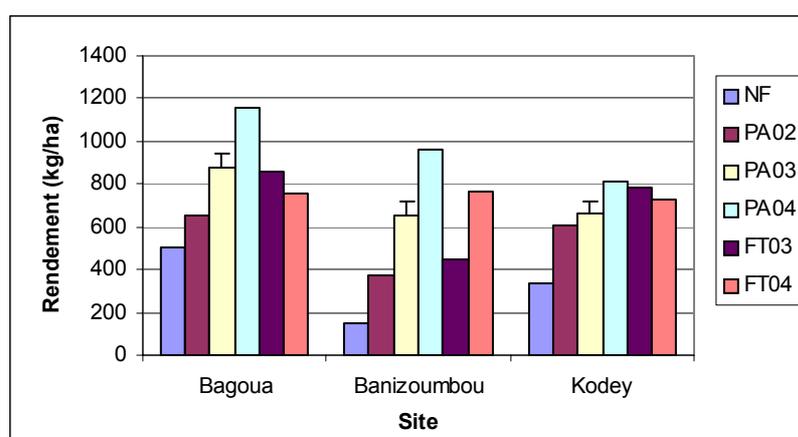


Figure 43. Rendements en grain par strate de fertilité et par site (2004)
(barres d'erreur = s.e.d. pour la comparaison des différentes strates à l'intérieur d'un site)

Effet de l'engrais chimique

L'effet de l'engrais chimique est significatif sur les rendements en grain ($p < 0,0001$). Les rendements moyens sont plus élevés lors de l'application de DAP + urée (720 kg ha^{-1}) et de DAP (718 kg ha^{-1}) que sans application d'engrais (591 kg ha^{-1}) (s.e.d. = $24,4 \text{ kg ha}^{-1}$). La comparaison entre DAP + urée et DAP n'est pas significative.

Effet de la variété

La variété présente un effet significatif sur les rendements en grain ($p < 0,0001$). La variété ICMV génère la meilleure production (748 kg ha^{-1}) tandis que les productions des variétés Zatih (672 kg ha^{-1}) et locale (612 kg ha^{-1}) sont inférieures (s.e.d. = $24,4 \text{ kg ha}^{-1}$). Notons que cette séquence diffère de celle obtenue en 2003 (ICMV > Local > Zatih).

Interactions

Comme c'était le cas pour le rendement en paille, l'interaction strate \times fertilisation est significative également pour le rendement en grain ($p = 0,0394$). Comme pour les rendements en paille, le rendement en grain des parcelles traitées par application de DAP + urée est légèrement supérieur à celui des parcelles traitées par DAP dans les strates PA03 et PA04 (Figure 44). Nous constatons également à nouveau que dans les strates PA04, PA03 et, dans une moindre mesure, FT03, les parcelles témoins obtiennent des rendements similaires à ceux des parcelles traitées par DAP. La distribution spatiale peu homogène du fumier et l'effet important de celui-ci sur les rendements pourraient avoir masqué l'effet de l'application d'engrais.

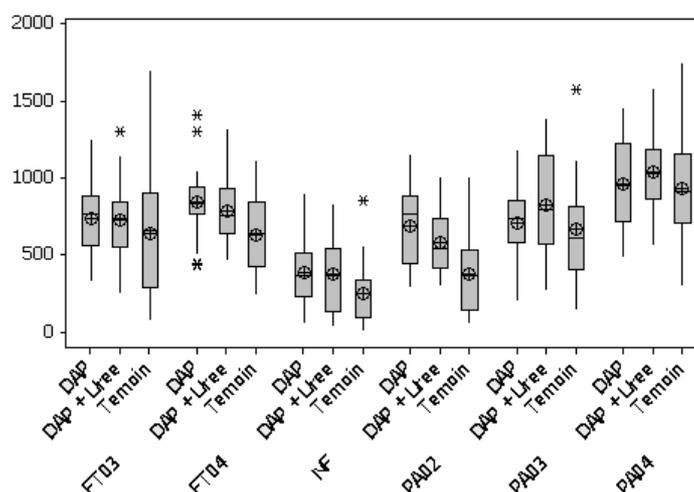


Figure 44. Graphique « boxplot » du rendement en grain (kg ha^{-1}) illustrant l'interaction strate \times fertilisation

7.6. Indice de récolte

Effet de la variété

L'effet des variétés améliorées sur l'indice de récolte est significatif ($p < 0,0001$). Les indices de récolte moyens pour les variétés ICMV (31,4 %) et Zatib (31,8 %) dépassent celui de la variété locale (28,1 %)(s.e.d. = 0,58 %).

L'interaction site \times variété ($p < 0,0001$) trahit le fait qu'à Kodey les indices de récolte ne diffèrent pas selon les variétés.

7.7. Nombres de poquets végétatifs et non matures par parcelle

Effet du site

Les nombres de poquets végétatifs et non matures sont les plus importants à Banizoumbou. Ils sont nettement supérieurs à ceux mesurés en 2003 (Tableau 25). Rappelons que le nombre de poquets végétatifs est inversement corrélé au rendement en grain et au taux de survie à la récolte dans tous les sites.

Tableau 25. Comparaison par site des nombres de poquets végétatifs et non matures en 2004 et 2003

	Site	2003	2004
Poquets végétatifs	Bagoua	0,60	5,59
	Banizoumbou	0,67	8,20
	Kodey	*	1,54
Poquets non matures	Bagoua	0,34	4,13
	Banizoumbou	0,60	6,23
	Kodey	*	2,06

Effet de la strate de fertilité

Comme en 2003, le nombre de poquets non matures et végétatifs est le plus élevé dans la strate non fumée (Tableau 26). Le nombre de poquets végétatifs par parcelle est également plus faible dans les strates PA04, PA03 et FT03.

Tableau 26. Nombres de poquets végétatifs et non matures par strate de fertilité (2004)

Strate	Poquets végétatifs	Poquets non matures
FT03	5,78	3,42
FT04	2,89	3,17
NF	11,44	7,03
PA02	6,48	4,90
PA03	2,27	3,72
PA04	1,79	2,59

Effet de l'engrais chimique

Comme en 2003, le Tableau 27 indique que les nombres de poquets végétatifs et non matures sont plus élevés dans les parcelles non fertilisées.

Tableau 27. Nombres de poquets végétatifs et non matures par niveau de fertilisation et par variété (2004)

	Poquets végétatifs	Poquets non matures
<i>DAP</i>	3,09	3,65
<i>DAP + urée</i>	3,29	3,69
<i>Témoin</i>	8,94	5,07
<i>ICMV IS 893</i>	4,39	4,41
<i>Locale</i>	5,75	4,62
<i>ZATIB</i>	5,19	3,38

Effet de la variété

Comme en 2003, les nombres de poquets non matures et végétatifs sont en moyenne les plus faibles pour la variété ICMV et les plus élevés pour la variété locale (Tableau 27). Le fait que la variété ICMV soit résistante aux insectes foreurs de tige, qui, s'ils sont présents peuvent perturber l'initiation de la panicule, pourrait expliquer le faible nombre de poquets végétatifs et non matures dans cette variété.

8. Analyse des rendements en mil en 2005

Remarquons que l'effet du site n'est pas significatif uniquement pour le rendement en paille et le taux de survie au démariage, tandis que l'effet de la strate de fertilité et l'interaction site \times strate sont significatives pour toutes les variables (Tableau 7-7 en Annexe 7).

Le Tableau 28 compare les variables mesurées par site par rapport à 2003 et 2004.

Tableau 28. Comparaison des variables mesurées par rapport à 2003 et à 2004

	Site	2005 (% 2003)	Différence (%)	2005 (% 2004)	Différence (%)
Rendement paille	<i>Bagoua</i>	44,2	-55,8	60,3	-39,7
	<i>Banizoumbou</i>	34,3	-65,7	123,6	23,6
	<i>Kodey</i>	96,9	-3,1	60,2	-39,8
Rendement grain	<i>Bagoua</i>	63,9	-36,1	55,2	-44,8
	<i>Banizoumbou</i>	60,5	-39,5	86,1	-13,9
	<i>Kodey</i>	74,0	-26,0	44,8	-55,2
Indice de récolte	<i>Bagoua</i>	123,4	23,4	95,6	-4,4
	<i>Banizoumbou</i>	135,9	35,9	87,3	-12,7
	<i>Kodey</i>	86,2	-13,8	83,6	-16,4
Poids grains épis¹	<i>Bagoua</i>	63,3	-36,7	59,4	-40,6
	<i>Banizoumbou</i>	74,3	-25,7	77,5	-22,5
	<i>Kodey</i>	66,1	-33,9	50,4	-49,6
Nombre d'épis poquet¹	<i>Bagoua</i>	108,7	8,7	98,9	-1,1
	<i>Banizoumbou</i>	88,8	-11,2	86,7	-13,3
	<i>Kodey</i>	/	/	81,6	-18,4
Nombre de talles poquet¹	<i>Bagoua</i>	106,4	6,4	96,1	-3,9
	<i>Banizoumbou</i>	110,1	10,1	107,0	7,0
	<i>Kodey</i>	115,2	15,2	69,4	-30,6
Taux de survie à la récolte	<i>Bagoua</i>	91,2	-8,8	94,2	-5,8
	<i>Banizoumbou</i>	93,2	-6,8	137,5	37,5
	<i>Kodey</i>	/	/	106,3	6,3
Taux de survie au démariage	<i>Bagoua</i>	129,2	29,2	107,4	7,4
	<i>Banizoumbou</i>	104,7	4,7	102,1	2,1
	<i>Kodey</i>	112,7	12,7	129,1	29,1

Effet de l'année significatif à $p < 0,0001$ pour chaque variable

8.1. Taux de survie au démariage et à la récolte

Effet du site

Le Tableau 29 nous renseigne que le taux de survie moyen au démariage est de 94 % dans les trois sites, il y a donc eu peu de stress avant le démariage. Le taux de survie à la récolte est significativement plus élevé à Banizoumbou que dans les autres sites. La différence entre les taux de survie au démariage et à la récolte est d'autant plus grande que la pluviométrie utile est faible (Figure 26).

Les deux taux de survie sont plus élevés qu'en 2004, excepté le taux de survie à la récolte enregistré à Bagoua (Tableau 28). Par rapport à 2003, le taux de survie au démariage est plus élevé en 2005 tandis le taux de survie à la récolte est plus faible.

Tableau 29. Taux de survie au démarrage et à la récolte par site (2005)

Site	Taux de survie au démarrage (%)	Taux de survie à la récolte (%)
<i>Bagoua</i>	94	66
<i>Banizoumbou</i>	94	82
<i>Kodey</i>	94	68
<i>s.e.d</i>	0,4	1,2
<i>p-valeur</i>	n. s.	< 0,0001

Effet de la strate de fertilité

L'effet de la strate de fertilité sur les taux de survie au démarrage et à la récolte est significatif ($p < 0,0001$). Le taux de survie au démarrage varie entre 96 % dans la strate FT05 et 92 % dans la strate NF (*s.e.d.* = 0,4 %). Il décroît selon la séquence suivante : FT05 > PA03 > PA04 > FT03 > PA05 > FT04 > NF.

Le taux de survie à la récolte suit une autre séquence : FT05 (78 %) > PA03 > PA04 > PA05 > FT03 > FT04 > NF (61 %) (*s.e.d.* = 1,2 %). Comme en 2004 et 2003, les parcelles de la strate NF obtiennent les taux de survie à la récolte les plus faibles. En 2005, toutefois, le taux de survie le plus élevé ne correspond pas au parcage de l'année. L'amélioration de la survie pourrait être un effet du traitement de fertilité organique mais dépend également des quantités de fumier appliquées et de la pluviométrie. Il semble qu'en 2005 l'effet du parcage de l'année soit beaucoup moins clair que les deux autres années. En tous cas, excepté pour la strate FT05, le taux de survie à la récolte suit la même évolution que les rendements en grain.

Effet de l'engrais chimique

Comme en 2003 et 2004, le taux de survie au démarrage est plus important pour les parcelles témoin que pour les parcelles fertilisées.

A nouveau, le taux de survie à la récolte est quand à lui plus faible pour les parcelles non traitées par application d'engrais (Tableau 30). Signalons que les comparaisons entre DAP et DAP + urée ne sont pas significatives. L'interaction site × fertilisation ($p < 0,0001$) s'explique par l'effet de la fertilisation sur le taux de survie à la récolte qui ne se marque qu'à Kodey.

Tableau 30. Taux de survie au démarrage et à la récolte par niveau de fertilisation (2005)

Fertilisation	Taux de survie au démarrage (%)	Taux de survie à la récolte (%)
<i>DAP</i>	93	73
<i>DAP + urée</i>	93	74
<i>Témoin</i>	96	69
<i>s.e.d.</i>	0,4	1,2
<i>p-valeur</i>	< 0,0001	0,0004

Effet de la variété

Le taux de survie au démarrage est influencé par la variété ($p < 0,0001$) de la façon suivante : variété ICMV (95 %) = variété Zatib (95 %) > variété locale (93 %)(*s.e.d.* = 0,4 %). L'interaction site × variété ($p = 0,0073$) s'explique par le fait qu'à Bagoua les différentes variétés donnent un taux de survie au démarrage similaire.

L'effet de la variété sur le taux de survie à la récolte ($p < 0,0001$) se marque de la façon suivante : variété ICMV (76,5 %) = variété Zatib (75,5 %) > variété locale (64 %)(s.e.d. = 1,2 %). A Bagoua, la variété Zatib génère un taux de survie à la récolte inférieur à celui de la variété ICMV (interaction site \times variété : $p = 0,0026$).

Interactions

L'interaction strate \times fertilisation est significative ($p < 0,0001$) pour le taux de survie à la récolte. Nous constatons que les différences de taux de survie obtenus dans les parcelles fertilisées ou non sont plus importantes dans la strate NF que dans les autres (Figure 45). Dans les strates FT03, FT05, PA03, PA04 et PA05, le taux de survie des parcelles non fertilisées est similaire voire supérieur à celui des parcelles traitées par application d'engrais. L'application d'engrais permet d'augmenter significativement le taux de survie à la récolte uniquement dans les parcelles n'ayant pas reçu de fumure organique. Ceci concorde avec l'analyse de cette même interaction en 2004 où seules les strates de fumure plus ancienne présentaient un effet de l'application d'engrais.

L'interaction fertilisation \times variété ($p = 0,0302$) s'explique par le fait que le taux de survie à la récolte de la variété Zatib dépasse celui de la variété ICMV dans les parcelles témoins, contrairement aux parcelles traitées par application d'engrais (Figure 46).

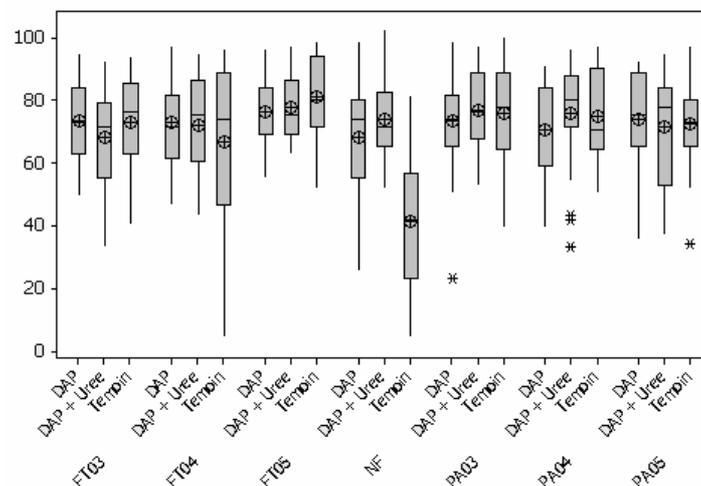


Figure 45. Graphe « boxplot » du taux de survie à la récolte (%) illustrant l'interaction strate x fertilisation

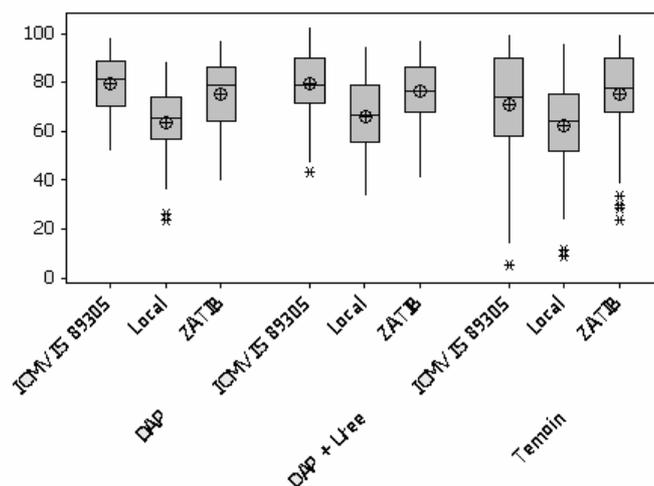


Figure 46. Graphe « boxplot » du taux de survie à la récolte (%) illustrant l'interaction fertilisation x variété

8.2. Rendements en paille

Effet du site

Contrairement à 2003 et 2004, l'effet du site sur les rendements en paille est non significatif. Kodey produit 927 kg paille ha⁻¹, Bagoua 901 kg paille ha⁻¹ et Banizoumbou 917 kg paille ha⁻¹ (s.e.d. = 37,5 kg ha⁻¹). Ces valeurs sont 40 % plus faibles qu'en 2004 sauf à Banizoumbou où les rendements en paille augmentent de 24 % (Tableau 28). Kodey obtient le meilleur rendement en paille mais montre pourtant le nombre de talles par poquet le plus faible et un taux de survie à la récolte plus faible qu'à Banizoumbou.

Effet de la strate de fertilité

L'effet de la strate de fertilité sur les rendements en paille est significatif ($p < 0,0001$). La strate PA03 donne les rendements les plus élevés (1175 kg ha⁻¹), suivies par les deux autres parcsages non statistiquement différents l'un de l'autre. Les rendements des parcelles où on a appliqué du fumier transporté sont plus faibles que ceux des parcsages et décroissent dans le sens : FT05 > FT04 > FT03. Une comparaison visuelle des parcelles des strates NF et PA03 est présentée en Annexe 9 (photos des parcelles d'essai le 13 juillet 2005).

Les rendements en paille sont plus faibles qu'en 2003 dans toutes les strates. Cela peut être expliqué par des quantités de fumier apportées au champ plus faibles (non vérifiable et peu probable à Kodey où 18000 kg fumier ha⁻¹ a été appliqué dans les strates PA05 et FT05) ou par la pluviométrie (plus faible à Bagoua et Banizoumbou qu'en 2003). Etant donné que cette diminution a lieu aussi dans les strates NF, l'épuisement progressif des nutriments présents initialement dans le sol peut également être incriminé. D'autre part, une connaissance de l'historique des champs permettrait de vérifier que les strates NF ne bénéficient pas d'un effet de fertilité résiduelle dû aux pratiques de fertilité antérieures à la mise en place de l'essai. Si un tel effet existe, il est normal qu'il soit plus marqué la première année de l'expérience (à Bagoua notamment).

Les rendements sont également inférieurs à ceux de 2004 et le maximum de rendement n'est pas atteint dans la strate du parcage de l'année en 2005. Il est probable que les quantités de fumier apportées par le parcage de l'année en 2005 soient en moyenne plus faibles qu'en 2004. Le fumier apporté par le parcage en 2003 semble montrer un arrière-effet prononcé sur les rendements en 2005. La minéralisation de la MOF apporterait suffisamment de nutriments aux plants de mil pour dépasser les rendements obtenus dans les strates de parcages plus récents. Ne disposant pas des mesures de MOF résiduelle pour estimer la quantité de fumier appliquée par le parcage en 2003, cette remarque reste une hypothèse.

L'interaction site \times strate est significative ($p < 0,0001$). L'analyse de la Figure 47 permet de remarquer les sites où le rendement en paille ne suit pas la tendance moyenne : PA03 > PA04 > PA05 > FT05 > FT04 > FT03 > NF.

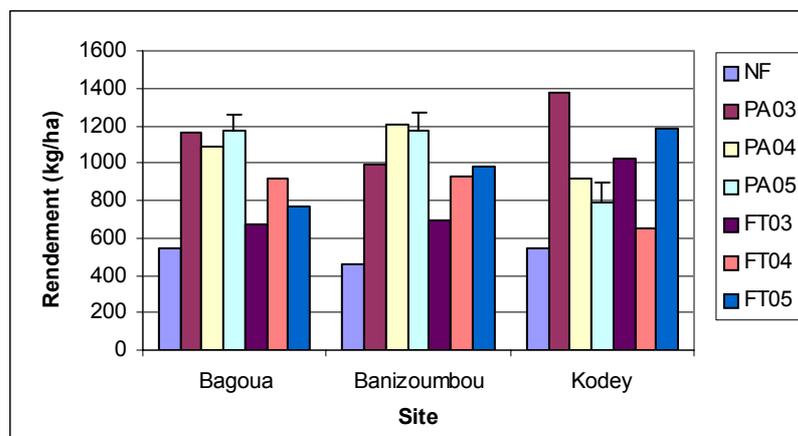


Figure 47. Rendements en paille par strate de fertilité et par site (2005) (barres d'erreur = s.e.d. pour la comparaison des différentes strates à l'intérieur d'un site)

A **Bagoua**, c'est la strate PA05 qui donne le rendement le plus élevé (1172 kg ha^{-1}), suivie de la strate PA03 (1164 kg ha^{-1}) et PA04 (1083 kg ha^{-1}) (s.e.d. = $86,6 \text{ kg ha}^{-1}$). Les différences de MOF résiduelle mesurée au sol en 2005 à Bagoua expliquent les rendements élevés obtenus dans la strate PA05 mais n'expliquent pas que les autres strates parcourées fournissent des rendements similaires (Figure 33). D'autre part, les mesures de MOF résiduelle au sol effectuées en 2004 dans la strate PA04 sont très inférieures à celles effectuées en 2005 en PA05 et semblent indiquer que la quantité de fumier appliquée en PA05 a été supérieure à Bagoua (Figure 31 et Figure 33), ce qui contredirait la remarque effectuée ci-dessus. Nous ne disposons toutefois pas de données permettant de quantifier la matière organique présente dans le compartiment sol dans les différentes strates.

A **Banizoumbou**, les rendements les plus élevés correspondent aux strates de fertilité PA04 (1209 kg ha^{-1}) et PA05 (1171 kg ha^{-1}) (s.e.d. = $93,7 \text{ kg ha}^{-1}$). Les mesures de MOF résiduelles effectuées dans les strates PA04 ($1447 \text{ kg MOF ha}^{-1}$) et PA05 ($5176 \text{ kg MOF ha}^{-1}$) y sont les plus importantes.

Les meilleurs rendements en paille à **Kodey** sont obtenus en PA03 (1372 kg ha^{-1}) et en FT05 (1189 kg ha^{-1}) (s.e.d. = $110,0 \text{ kg ha}^{-1}$). Les résidus de MOF mesurés dans les strates PA05 et PA04 sont moins élevés qu'à Banizoumbou tandis que les résidus de PA03 y sont

plus élevés (Figure 33), ceci concorde avec les rendements en pailles obtenus. Notons qu'en 2004, les rendements en paille obtenus dans la strate PA03 étaient plus élevés à Bagoua qu'à Kodey. De telles données semblent indiquer que Kodey ait reçu plus de fumier lors du parcage de 2003 que les deux autres sites ou que le fumier déposé en PA03 à Kodey se décompose plus lentement que sur les autres sites, offrant ainsi un effet prolongé dans le temps.

Comme en 2004, la strate FT03 à Kodey donne des rendements en paille supérieurs à ceux des strates FT04 et PA04.

Les trois sites donnent des rendements différents selon les strates et c'est la moyenne élevée obtenue à Kodey qui force la moyenne entre sites à être la plus élevée dans la strate PA03.

Effet de l'engrais chimique

L'effet de l'application d'engrais sur les rendements en paille est significatif ($p < 0,0001$). Les rendements sont plus élevés lors de l'application de DAP + urée (1044 kg ha^{-1}) que lors de l'application de DAP seul (935 kg ha^{-1}) et sans application d'engrais (766 kg ha^{-1}) (s.e.d. = $37,5 \text{ kg ha}^{-1}$). Les comparaisons entre moyennes sont toutes significatives.

L'interaction site \times fertilisation ($p = 0,0001$) reflète que l'effet de l'engrais chimique ne soit pas significatif à Bagoua et que la différence entre DAP et DAP + urée ne soit pas significative à Banizoumbou.

Effet de la variété

La variété a le même effet ($p = 0,017$) qu'en 2003 : la variété locale permet d'atteindre le meilleur rendement en paille (972 kg ha^{-1}). Les rendements obtenus par les variétés ICMV (906 kg ha^{-1}) et Zatib (867 kg ha^{-1}) ne sont pas significativement différents (s.e.d. = $37,5 \text{ kg ha}^{-1}$).

Interactions

Comme en 2004, l'interaction strate \times fertilisation est significative ($p < 0,0001$). La Figure 48 indique que, contrairement aux autres strates, le rendement des parcelles témoin dans les strates FT05, PA03, PA04 et PA05 obtiennent des rendements similaires à ceux des parcelles traitées par DAP. A nouveau, l'effet important de l'application de fumier sur les rendements semble avoir masqué l'effet de l'application d'engrais.

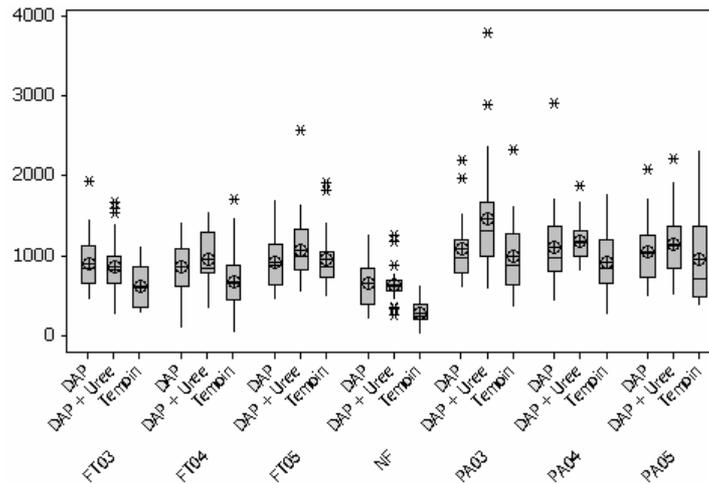


Figure 48. Graphe « boxplot » du rendement en paille (kg ha^{-1}) illustrant l'interaction strate x fertilisation

8.3. Nombre de talles et nombre d'épis par poquet

Effet du site

Le nombre de talles par poquet est le plus faible à Kodey où il diminue de 31 % par rapport à 2004 (Tableau 31). Le nombre d'épis par poquet est significativement plus élevé à Bagoua que dans les autres sites.

Ces nombres sont inférieurs à ceux de 2004 excepté à Banizoumbou où le nombre de talles par poquet augmente de 7 % (Tableau 28).

Tableau 31. Nombre de talles et d'épis par poquet par site (2005)

Site	Nombre de talles et d'épis par poquet	
	Nombre de talles poquet ⁻¹	Nombre d'épis poquet ⁻¹
Bagoua	3,67	3,08
Banizoumbou	3,76	2,54
Kodey	3,17	2,61
s.e.d	0,106	0,065
p-valeur	< 0,0001	< 0,0001

Effet de la strate de fertilité

Le nombre moyen de talles par poquet est maximal en PA04 (3,87) et minimal en NF (2,76). Ce nombre montre la même évolution que les rendements en paille (Tableau 32).

Le nombre d'épis par poquet est significativement plus élevé dans les trois strates de parcs que dans les strates de fumier transporté.

Tableau 32. Nombre de talles et d'épis par poquet par strate de fertilité (2005)

Strate	Nombre de talles poquet⁻¹	Nombre d'épis poquet⁻¹
<i>FT03</i>	3,50	2,48
<i>FT04</i>	3,51	2,61
<i>FT05</i>	3,69	2,80
<i>NF</i>	2,76	2,23
<i>PA03</i>	3,57	3,05
<i>PA04</i>	3,87	3,09
<i>PA05</i>	3,83	2,95
<i>s.e.d.</i>	0,162	0,100
<i>p-valeur</i>	< 0,0001	< 0,0001

Effet de l'engrais chimique

Comme les années précédentes, l'effet moyen de l'engrais chimique sur le nombre de talles par poquet est significatif (Tableau 33). Il est en moyenne plus élevé pour les parcelles ayant reçu du DAP + urée mais remarquons que la comparaison entre DAP et DAP + urée n'est pas significative. L'interaction site × fertilisation ($p < 0,0001$) indique que l'effet de l'application d'engrais n'est pas visible à Kodey.

Tableau 33. Nombre de talles et d'épis par poquet par niveau de fertilisation (2005)

Fertilisation	Nombre de talles poquet⁻¹	Nombre d'épis poquet⁻¹
<i>DAP</i>	3,64	2,71
<i>DAP + urée</i>	3,80	2,79
<i>Témoin</i>	3,16	2,73
<i>s.e.d.</i>	0,106	0,065
<i>p-valeur</i>	< 0,0001	n. s.

L'effet de l'engrais chimique sur le nombre d'épis par poquet n'est pas significatif. L'interaction site × fertilisation ($p < 0,0001$) indique l'effet de la fertilisation sur le nombre d'épis par poquet se marque à Banizoubou. Ceci provient vraisemblablement du fait que ce site bénéficie de la pluviométrie utile la plus élevée en phase végétative (entre 0 et 50 JAS) et que l'effet de la fertilisation y a été le moins limité par la disponibilité en eau.

Effet de la variété

L'effet moyen de la variété sur le nombre de talles par poquet est significatif ($p < 0,0001$). Comme les années précédentes, celui-ci est plus élevé pour la variété locale (3,81) que pour les variétés améliorées (3,47 et 3,32 pour ICMV et Zatib, respectivement)(s.e.d. = 0,106).

Contrairement aux années précédentes, la variété montre un effet sur le nombre d'épis par poquet ($p = 0,0064$). Le nombre d'épis par poquet est supérieur pour les variétés locale (2,83) et ICMV (2,77) que pour la variété Zatib (2,63)(s.e.d. = 0,065).

Interactions

Aucune interaction significative excluant l'effet du site n'est relevée.

8.4. Poids des grains par épi

Effet du site

Le poids des grains par épi est clairement plus faible à Kodey que dans les deux autres sites (Tableau 34). Ceci pourrait refléter la pluviométrie utile pendant les phases reproductives et de remplissage des grains (> 50 JAS) plus faible à Kodey (194 mm) que dans les autres sites (203 mm en moyenne).

Tout comme le nombre d'épis par poquet, le poids des grains est plus faible qu'en 2004 (Tableau 28). Ce poids diminue de 26 à 37 % selon les sites en comparaison avec 2003.

Tableau 34. Poids des grains par épis par site (2005)

Site	Poids des grains épi ⁻¹ (g)
<i>Bagoua</i>	22,4
<i>Banizoumbou</i>	22,9
<i>Kodey</i>	17,5
<i>s.e.d.</i>	0,59
<i>p-valeur</i>	< 0,0001

Effet de la strate de fertilité

L'effet de la strate de fertilité sur le poids des grains par épi est significatif ($p < 0,0001$). Le poids des grains est plus élevé dans les strates PA03 (23,2 g), PA04 (22,5 g), PA05 (22,3 g) que dans les autres strates ($s.e.d. = 0,90$ g). La strate NF génère les poids des grains par épis moyen le plus faible (17,8 g).

Effet de l'engrais chimique

Le poids des grains par épi est en moyenne plus élevé dans les parcelles traitées par application d'engrais (Tableau 35) que les parcelles non traitées. La comparaison entre DAP et DAP + urée n'est pas significative.

L'interaction site \times fertilisation ($p < 0,0001$) renseigne qu'à Kodey, l'effet de l'engrais ne soit pas significatif. A Kodey, l'application d'engrais n'a pas eu d'effet non plus sur le nombre d'épis par poquets alors que ce site était le seul où l'effet de la fertilisation était présent sur le taux de survie. Il semble que la fertilisation n'ait pas permis de fournir des nutriments sur une longue période, jusqu'à la deuxième moitié du cycle. Ceci concorderait avec les observations notées par de Rouw (2004) qui indique que lorsque la contribution des talles au rendement en grain n'augmente pas sous l'effet de la fertilisation, l'augmentation de rendement peut être obtenue en relevant le taux de survie. D'autre part, l'effet de l'engrais à Kodey a peut-être été conditionné par une pluviométrie utile inférieure à celle des autres sites.

Tableau 35. Poids des grains par épis par niveau de fertilisation (2005)

Fertilisation	Poids des grains épi ⁻¹ (g)
<i>DAP</i>	21,20
<i>DAP + urée</i>	21,97
<i>Témoin</i>	19,57
<i>s.e.d.</i>	0,59
<i>p-valeur</i>	0,0002

Effet de la variété

L'effet de la variété sur le poids des grains par épis ($p < 0,0001$) est identique aux années antérieures : la variété locale enregistre le poids des grains par épi le plus élevé (23,4 g) comparé à 20,9 g et 18,4 g pour les variétés ICMV et Zatib, respectivement (s.e.d. = 0,59 g).

Interactions

Aucune interaction significative excluant l'effet du site n'est relevée.

8.5. Rendements en grain

Effet du site

L'effet du site est significatif sur les rendements en grain ($p < 0,0001$). Banizoumbou obtient le meilleur rendement (492 kg ha⁻¹), suivi de Bagoua (443 kg ha⁻¹) et de Kodey (293 kg ha⁻¹) (s.e.d. = 12,8 kg ha⁻¹). Ces valeurs sont toujours inférieures à celles des années précédentes (diminution de 45 % à Bagoua, 14 % à Banizoumbou et 55 % à Kodey comparé à 2004). On observe la même séquence dans les rendements en grains qu'en 2003 mais les rendements ont respectivement baissé de 36 %, 39 % et 26 % (Tableau 28).

Ces résultats reflètent l'impact de la pluviométrie utile plus importante à Banizoumbou qu'à Kodey et à Bagoua (tout comme en 2003). La pluviométrie utile en 2005 est plus faible qu'en 2004, sauf à Banizoumbou (Figure 26). Le fait que le rendement en grain soit moins élevé à Kodey qu'à Bagoua malgré que la pluviométrie y soit plus élevée pourrait être expliqué par la meilleure « fertilité » inhérente à Bagoua (bien que les quantités de MOF résiduelles soient plus importantes à Bagoua uniquement dans les strates PA04 et FT05, Figure 33).

Les trois paramètres de rendement sont bien liés aux niveaux des rendements en grain obtenus dans chacun des sites. A Bagoua, même si le taux de survie à la récolte est légèrement plus faible qu'à Kodey, le nombre plus élevé d'épis par poquet et le poids des grains par épi supérieur donne un rendement en grains plus élevé. Le rendement en grain est maximal à Banizoumbou à cause du taux de survie et du rendement en grain par épi les plus élevés et ce même si le nombre d'épis par poquet y est le plus faible comparé aux autres sites.

Effet de la strate de fertilité

L'effet de la strate de fertilité sur les rendements en grain est significatif ($p < 0,0001$). Les rendements moyens en grain suivent la même séquence que les rendements en paille, le maximum étant atteint dans la strate PA03 (Tableau 36).

Les rendements en grain sont inférieurs aux rendements des autres années, et ce dans toutes les strates de même âge. Des hypothèses explicatives ont été avancées au point 18.2 Rendement en paille.

Les strates PA03 et PA04 donnent les meilleurs rendements grâce à leurs poids des grains par épi et leurs nombres d'épis par poquet élevés (Tableau 36). Dans la strate FT05,

c'est plutôt le taux de survie élevé à la récolte que le faible poids des grains par épi qui permet d'atteindre le rendement observé. Le nombre d'épis par poquet reflète la même évolution que le rendement en grain.

Tableau 36. Paramètres de rendement et rendements en grain moyens par strate (2005)

Strate	Taux de survie à la récolte (%)	Nombre d'épis poquet ⁻¹	Poids des grains épi ⁻¹ (g)	Rendement en grain (kg ha ⁻¹)	Classement
FT03	71	2,48	20,5	353	6
FT04	71	2,61	21,0	396	5
FT05	78	2,80	19,1	407	4
NF	61	2,23	17,8	224	7
PA03	75	3,05	23,2	531	1
PA04	74	3,09	22,5	504	2
PA05	73	2,95	22,3	451	3
s.e.d.	1,8	0,100	0,90	19,5	
p-valeur	<0,0001	<0,0001	<0,0001	<0,0001	

L'interaction site × strate ($p < 0,0001$) est illustrée dans la Figure 49. Notons que les rendements des strates PA03, PA04 et PA05 ne diffèrent qu'à **Banizoumbou**. Les strates PA03 (709 kg ha⁻¹) et PA04 (647 kg ha⁻¹) y donnent les meilleurs rendements, suivies de ceux obtenus dans les strates FT04, FT05 et PA05, non significativement différents (474 kg ha⁻¹ en moyenne). Rappelons que les mesures de MOF résiduelles sont les plus importantes dans les strates PA04 et PA05 mais nous supposons que la strate PA03 possède un arrière-effet bénéfique sur les rendements. Le rendement en grain de la strate PA03 est dû à la fois au meilleur nombre d'épis par poquet (3,08) et aux deuxièmes meilleurs poids des grains par épi (26 g) et taux de survie (87 %) du site.

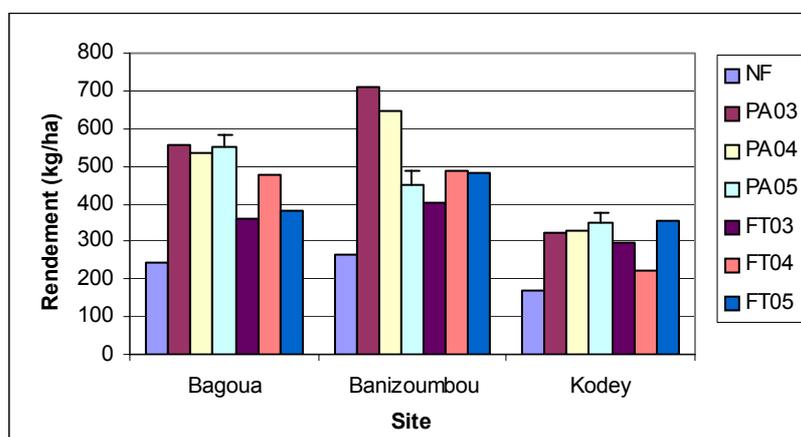


Figure 49. Rendements en grain par strate de fertilité et site (2005)
(barres d'erreur = s.e.d. pour la comparaison des différentes strates à l'intérieur d'un site)

A **Bagoua**, les strates PA03 (558 kg ha⁻¹) et PA05 (550 kg ha⁻¹) donnent les meilleurs rendements en grain. La strate PA05 montre le nombre d'épis par poquet le plus élevé entre sites et un poids des grains par épi de 27 g (le meilleur pour ce site). Le meilleur rendement a lieu en PA03 à cause de la conjonction d'un bon poids des grains par épi (25 g), d'un bon nombre d'épis par poquet (3,39) et d'un taux de survie plus élevé (69 %) qu'en PA05. L'effet

résiduel du fumier transporté en 2004 (FT04) sur les rendements est supérieur à l'effet direct du fumier appliqué en 2005 (FT05). Ceci pourrait être expliqué par le fait que la MOF résiduelle mesurée indique que les quantités de fumier transporté appliquées en 2005 étaient bien inférieures à celles appliquées en 2004 (Figure 31 et Figure 33).

A **Kodey**, le rendement le plus élevé est obtenu dans la strate FT05 (357 kg ha⁻¹) mais celui-ci n'est pas significativement différent de celui obtenu dans les strates PA03, PA04 et PA05 (352 kg ha⁻¹). Le rendement obtenu dans la strate FT05 dépend essentiellement du poids des grains par épi (18,1 g, le meilleur du site) et d'un nombre suffisant d'épis par poquet (2,83). Dans la strate PA05, le nombre d'épis par poquet et le rendement en grain par épi ne sont pas très élevés mais le taux de survie à la récolte important (81 %) permet d'y obtenir le meilleur rendement en grain à Kodey. Contrairement aux autres sites, le rendement de la strate FT03 dépasse celui de la strate FT04.

Les rendements en grain des strates NF valent 263 kg ha⁻¹ à Banizoumbou, 242 kg ha⁻¹ à Bagoua et 168 kg ha⁻¹ à Kodey, c'est-à-dire qu'ils suivent la séquence des rendements moyens par site. Cette séquence s'inverse dans le cas des rendements en paille. Les faibles rendements en grain des parcelles non fumées à Kodey résultent à la fois du taux de survie et du nombre d'épis par poquet les plus faibles dans cette strate. Remarquons que le poids des grains par épi est à Kodey le plus élevé dans la strate NF (19 g).

Effet de l'engrais chimique

L'effet de l'application d'engrais est significatif sur les rendements en grain ($p < 0,0001$). Les rendements sont plus élevés lors de l'application de DAP + urée (445 kg ha⁻¹) que lors de l'application de DAP seul (409 kg ha⁻¹) et sans application d'engrais (373 kg ha⁻¹), toutes les comparaisons étant significatives (s.e.d. = 12,8 kg ha⁻¹).

L'interaction site × fertilisation ($p < 0,0001$) est expliquée par le fait que l'effet de l'engrais chimique sur les rendements en grain ne se marque en réalité qu'à Banizoumbou où les rendements en grain sont les plus élevés avec l'application d'engrais : 562 kg ha⁻¹ (DAP + urée) et 516 kg ha⁻¹ (DAP). Le rendement obtenu grâce à l'application de DAP + urée provient du poids des grains par épi (25 g) et du taux de survie (82 %) les plus importants entre sites. Ceci reflète que la pluviométrie utile a été plus élevée à Banizoumbou que dans les autres sites et que la réponse à la fertilisation est conditionnée par la limitation en eau (Bationo et al., 2003 ; Muehlig-Versen et al., 2003).

Effet de la variété

L'effet de la variété ($p < 0,001$) sur les rendements en grain va dans le même sens que les années précédentes. La variété ICMV fournit le meilleur rendement (443 kg ha⁻¹), suivie des variétés locale (410 kg ha⁻¹) et Zatib (374 kg ha⁻¹) (s.e.d. = 12,8 kg ha⁻¹).

L'interaction site × variété ($p = 0,0015$) est expliquée par le fait qu'à Banizoumbou les rendements des variétés Zatib et locale ne diffèrent pas, tandis qu'à Kodey les rendements en grain des variétés locale et ICMV ne sont pas différentes.

Interactions

L'interaction strate × fertilisation est significative ($p = 0,0171$), l'effet de l'engrais chimique est donc modulé par la strate de fertilité organique. Remarquons que le rendement en grain obtenu dans les parcelles non traitées par engrais est similaire ou dépasse celui obtenu par application de DAP dans toutes les strates excepté NF et FT04 (Figure 50). Dans ces strates de fumure, l'effet de l'apport de fumier masque l'effet de l'engrais DAP.

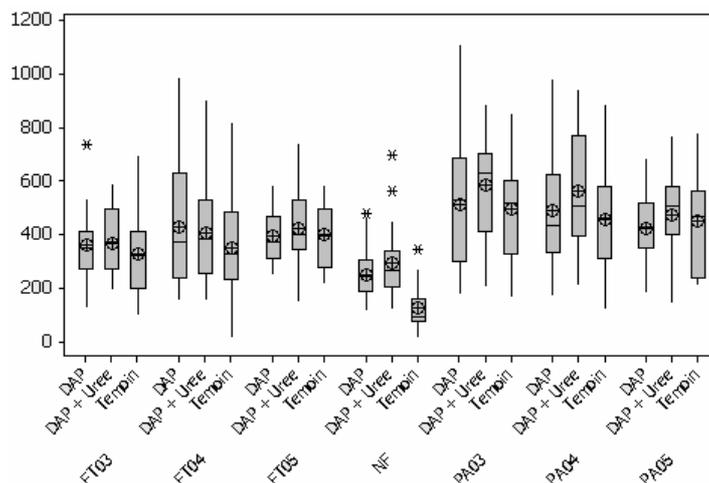


Figure 50. Graphique « boxplot » du rendement en grain (kg ha^{-1}) illustrant l'interaction strate x fertilisation

8.6. Indice de récolte

Effet de la variété

L'effet des variétés améliorées sur l'indice de récolte apparaît ($p < 0,0001$). Les indices de récolte moyens pour les variétés ICMV (28,9 %) et Zatib (26,4 %) dépassent celui de la variété locale (26,1 %) mais la différence entre variété locale et Zatib n'est pas significative (s.e.d. = 0,62).

8.7. Nombres de poquets non matures et végétatifs

Effet du site

Les nombres de poquets végétatifs et non matures sont plus importants à Kodey que dans les autres sites (Tableau 37). Ils reflètent l'importance de la pluviométrie utile dans chaque site et la meilleure fertilité inhérente au site de Bagoua.

Tableau 37. Nombres de poquets végétatifs et non matures par site (2005)

Site	Poquets végétatifs	Poquets non matures
Bagoua	1,60	2,37
Banizoumbou	2,02	0,56
Kodey	8,04	5,81

Effet de la strate de fertilité

Le nombre de poquets végétatifs est le plus élevé dans la strate NF et le plus faible en FT05, il semble diminuer avec les rendements mais il est toutefois élevé en PA03. Le nombre de poquets non matures suit presque la même évolution que les rendements en grain sauf dans la strate PA03 où il est le plus élevé (Tableau 38).

Tableau 38. Nombres de poquets végétatifs et non matures par strate de fertilité (2005)

Strate	Poquets végétatifs	Poquets non matures
FT03	4,51	3,65
FT04	3,17	2,75
FT05	0,56	2,12
NF	9,06	3,84
PA03	7,30	4,47
PA04	0,95	2,28
PA05	1,65	1,26

Effet de l'engrais chimique

Le Tableau 39 indique que, tout comme les années précédentes, le nombre de poquets végétatifs et non matures est plus élevé dans les parcelles non traitées par application d'engrais.

Tableau 39. Nombres de poquets végétatifs et non matures par niveau de fertilisation et par variété (2005)

	Poquets végétatifs	Poquets non matures
DAP	2,18	2,31
DAP + urée	2,27	2,31
Témoin	7,21	4,11
ICMVIS 893	3,78	2,85
Locale	4,21	3,53
ZATIB	3,67	2,35

Effet de la variété

Comme les années antérieures, les nombres de poquets végétatifs et non matures sont plus élevés pour la variété locale (Tableau 39). Contrairement à 2004, remarquons que la variété Zatib permet d'atteindre les nombres de poquets non matures et végétatifs les plus faibles.

9. Evolution de la phénologie en 2005

Les observations des stades phénologiques ont été effectuées sur les tiges principales en moyenne une fois par semaine au niveau de chaque parcelle. En 2005, les dates de l'émergence du premier talle, de l'apparition de la feuille de la panicule, de la floraison, des 50 % de floraison et de la maturité ont été consignées. Rappelons que l'émergence du premier talle (stade 3) concerne la fin de la phase végétative et le début de la phase reproductive, celle-ci cédant la place à la phase de remplissage des grains lorsque la floraison est terminée.

Pour comparer les résultats, les moyennes des dates auxquelles un stade phénologique est atteint ont été calculées par site, par strate, par niveau de fertilisation et par variété. Les résultats sont présentés en Annexe 10.

Effet du site

Nous remarquons que Kodey est en avance par rapport aux autres sites. Ce champ atteint en moyenne la maturité 10 JAS (jours après semis) avant Bagoua et 8 JAS avant Banizoumbou (Figure 51). Kodey a bénéficié d'une bonne pluie de semis et a été semé et récolté avant les autres sites. Bagoua a atteint la maturité après Banizoumbou et il a été récolté en dernier.

L'émergence du premier talle n'a été relevée qu'à Banizoumbou à 27 JAS en moyenne. Notons que cette observation contredit la durée de la phase végétative fixée par de Rouw et Rajot (2004) entre 0 et 50 JAS.

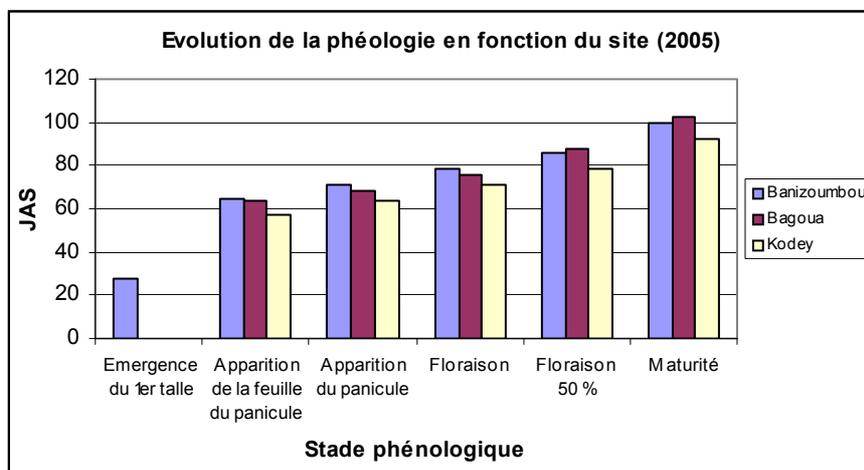


Figure 51. Evolution de la phénologie de la tige principale du mil au cours de la saison

Effet de la strate de fertilité

A Bagoua, nous constatons que les strates FT04 et FT05 accusent un léger retard par rapport aux strates avec parcage. D'autre part, la première strate à atteindre le stade de la maturité est la strate FT03 (90 JAS), rapidement suivie par la strate NF (95 JAS). A Banizoumbou, les différences entre strates sont faibles, excepté pour la strate NF qui accuse un retard d'environ 8 jours sur toutes les autres strates. A Kodey, nous observons que les

strates parquées (PA03, PA04 et PA05) possèdent dès le premier stade noté une avance de 7 à 8 jours sur les autres strates.

Nous concluons que la pratique du parcage accélère le développement par rapport à la pratique du fumier transporté. L'analyse doit rester prudente ; nous remarquons que ces moyennes de dates à laquelle un stade phénologique est atteint sont essentiellement indicatives car l'imprécision des dates est d'au moins 8 jours.

Le développement plus rapide du mil provient sans doute de la meilleure qualité et des quantités plus importantes de fumier appliqué par le parcage par rapport au fumier transporté.

Au niveau de la qualité, le fumier apporté par le parcage possède un double avantage sur l'alimentation précoce en nutriments des plantules : les taux de N dans le fumier transporté sont plus faibles que dans le fumier obtenu par parcage, le NH₃ présent dans l'urine étant le plus souvent perdu par volatilisation (Esse et al., 2001) et N présent dans l'urine est plus rapidement disponible pour les plantes tandis que le fumier requiert une décomposition plus avancée avant que N ne devienne disponible (Ikpe et al., 1999). D'autre part, l'application d'urine a pour effet d'élever le pH du sol, particulièrement la première semaine après application (Powell et al., 1998), ce qui permet d'augmenter la disponibilité de P pour les plantes.

Plus la quantité de fumier appliquée est élevée, plus celui-ci protège mécaniquement la surface du sol lorsqu'il est peu couvert par la culture. De Rouw et Rajot (2004) ont montré que les conditions de croissance étaient stimulées au début du cycle végétatif car le fumier piègeait les particules mobiles pendant les tempêtes, réduisait l'encroûtement et favorisait l'infiltration.

Effet de l'engrais chimique

Dans tous les sites, les parcelles non traitées par application d'engrais atteignent les stades phénologiques plus tard que les parcelles traitées. Nous concluons que l'application d'engrais permet un développement plus rapide des plants. Ceci est confirmé par les résultats de nombreux auteurs. Muehlig-Versen et al. (2003), entre autres, notent que l'apport de P au poquet permet de favoriser le développement initial des plantules par rapport à des plants « témoins » non fertilisés. Cet effet bénéfique de l'engrais est attribué à une croissance initiale des feuilles plus rapide, ce qui permet une interception des radiations plus efficace, un développement racinaire rapide et une augmentation de l'eau extraite par transpiration. L'application localisée de P permet d'améliorer le prélèvement de K et de N par les plantules.

Nous n'observons graphiquement jamais de différences entre DAP et DAP + urée.

Effet de la variété

L'effet de la variété ne semble pas influencer la vitesse du développement. Les évolutions sont en tous points similaires jusqu'au stade de 50 % de floraison. Nous remarquons cependant que la variété locale atteint la maturité 7 à 10 JAS après les variétés améliorées. Les variétés améliorées ont en effet un cycle de développement légèrement plus court que la variété locale.

10. Evaluation des contraintes biotiques en 2003, 2004 et 2005

Les observations d'ordre phytosanitaire ont été effectuées à la récolte. Pour comparer les résultats, les moyennes des nombres de poquets atteints par le mildiou et des nombres de plants shibra par parcelle ont été calculées sur toutes années et sites confondus, par niveau de fertilisation et par variété. Nous avons rapporté le nombre de poquets atteints par le mildiou au taux de survie à la récolte afin d'obtenir la proportion de poquets atteints par rapport au total de poquets récoltés. L'occurrence des plants parasites *Striga hermonthica* a été évaluée sur base d'une échelle qualitative (0 = nulle, 1 = faible, 2 = moyenne et 3 = élevée). La proportion de plants *S. hermonthica* par parcelle est une variable discrète mais nous l'avons traitée comme si elle était continue en effectuant des moyennes arithmétiques. Les résultats sont présentés en Annexe 11.

Effet du site

Nous remarquons que la proportion de poquets atteints par le mildiou est toujours plus élevée à Bagoua. Le nombre de plants de shibra par parcelle est plus élevé à Banizoumbou en 2003, à Bagoua en 2004 et à Kodey en 2005. L'occurrence moyenne de *S. hermonthica* est particulièrement élevée à Kodey en 2004 et en 2005.

Effet de l'engrais chimique

Dans tous les sites, les parcelles non traitées par application d'engrais semblent les moins atteintes par le mildiou et le shibra (Figure 52 et Figure 53). Les différences sont très faibles mais pourraient indiquer que l'application d'engrais bénéficie également au développement des adventices (shibra) et à l'infection par le mildiou.

L'occurrence moyenne de *S. hermonthica* est plus faible lors de l'application de DAP + urée et plus élevée lors de l'application de DAP seul (Figure 54). Ceci peut signifier que la fertilisation par DAP entraîne une légère diminution de l'incidence du striga sur les rendements par rapport à la fertilisation par DAP + urée. Toutefois, les différences d'infestation par le striga sont très faibles et ne mènent pas à des différences de rendement (Tableau 44).

Effet de la variété

L'effet de la variété est visible sur la proportion de poquets atteints par le mildiou et les nombres de plants shibra (Figure 52 et Figure 53). Les variétés améliorées ICMV et Zatib sont en effet résistantes au mildiou. La variété Zatib paraît néanmoins moins performante que la variété ICMV. Les plants shibra proviennent d'un croisement entre mil cultivé et mil sauvage et ils contaminent très peu les semences des variétés améliorées.

La proportion de *S. hermonthica* est par contre plus élevée dans les parcelles contenant les variétés améliorées (Figure 54). La variété locale semble avoir un léger effet bénéfique sur la réduction de l'infestation par la plante parasite.

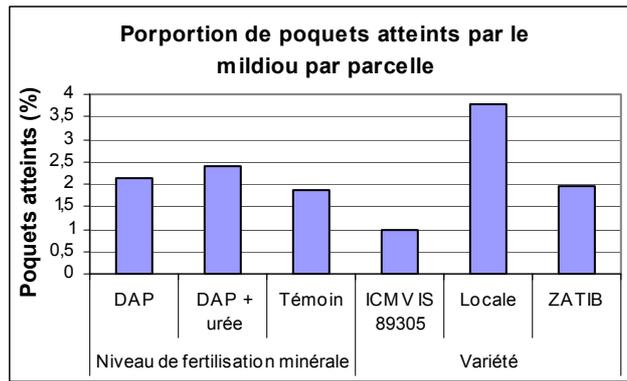


Figure 52. Nombre moyen de poquets atteints par le mildiou par parcelle en fonction du niveau de fertilisation minérale et de la variété du mil

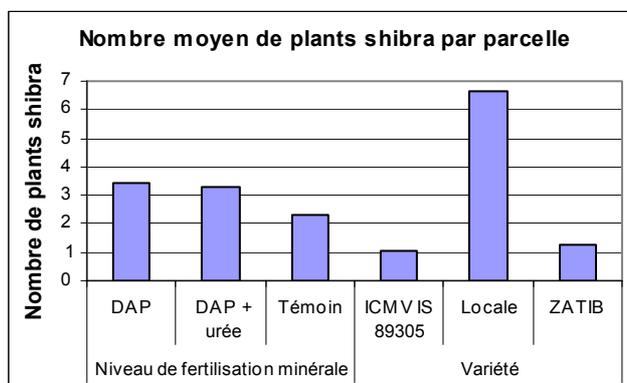


Figure 53. Nombre moyen de plants shibra par parcelle en fonction du niveau de fertilisation minérale et de la variété du mil

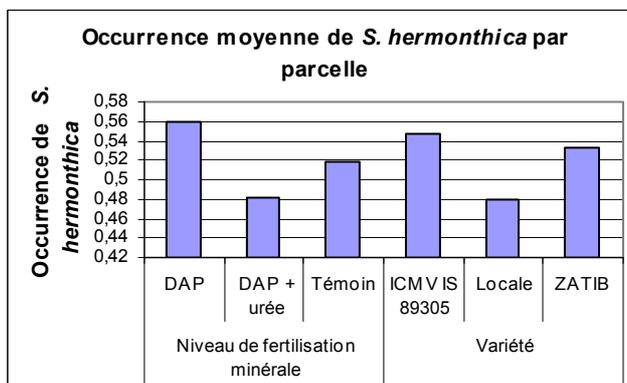


Figure 54. Occurrence moyenne de *S. hermonthica* par parcelle en fonction du niveau de fertilisation minérale et de la variété du mil

11. Analyse récapitulative : effets significatifs sur 3 ans

Nous allons citer rapidement les effets significatifs dans l'analyse sur 3 ans en référant le lecteur aux parties antérieures pour le détail par année. Afin de faciliter la comparaison entre années, nous utiliserons la nomenclature suivante dans la description de l'effet de la strate de fertilité organique. **PA**, **PA-1** et **PA-2** représentent le parcage de l'année, le parcage vieux d'un an et vieux de 2 ans ; **FT**, **FT-1** et **FT-2** renvoient au fumier transporté de l'année, au fumier transporté vieux d'un an et vieux de 2 ans et **NF** à la strate non fumée.

Les tableaux de moyennes, d'ANOVA et de comparaisons multiples entre moyennes sont présentés en Annexe 8. Les tableaux 8-1 à 8-3 montrent les résultats de l'analyse globale sur les 3 années de l'essai. Soulignons que les comparaisons de moyennes (et les s.e.d. associées) n'ont été effectuées que pour les strates présentes les 3 années : NF, FT, PA, PA-1 et PA-2. Les comparaisons de moyennes (et les s.e.d. associées) entre années n'ont pas pu être calculées par le modèle statistique car le nombre de d'observations est différent selon les années si on prend en compte toutes les strates de fertilité organique.

Les tableaux 8-4 à 8-6 (Annexe 8) illustrent les résultats obtenus lorsque les strates FT-1 et FT-2 sont omises pour que les moyennes entre années possèdent le même effectif. Cette deuxième série de résultats sera utilisée pour comparer les moyennes entre années (point 11.1).

Les comparaisons de moyennes par site du taux de survie et du nombre d'épis par poquets n'ont pas été effectuées à Kodey pour cause de données manquantes en 2003.

11.1. Effet de l'année

Remarquons que l'effet de l'année est significatif sur toutes les variables considérées ($p < 0,0001$) (Tableau 41). L'effet de l'année peut être expliqué par la pluviométrie et sa distribution, par les quantités de fumier appliquées ainsi que par des attaques éventuelles d'insectes et maladies. Remarquons que la pluviométrie et les quantités de fumier diffèrent également entre chaque site chaque année.

Le **rendement** en paille moyen diminue avec les années : 1891 kg ha⁻¹ en 2003, 1232 kg ha⁻¹ en 2004 et 957 kg ha⁻¹ en 2005 (s.e.d. = 47,5 kg ha⁻¹). Le rendement en grain moyen est plus élevé en 2004 (674 kg ha⁻¹) qu'en 2003 (634 kg ha⁻¹) et en 2005 (423 kg ha⁻¹)(s.e.d. = 15,2 kg ha⁻¹).

Les **quantités de fumier** résiduelles en 2003 ne sont pas connues, mais en supposant que la fraction de MOF décomposée par an est la même chaque année, on peut estimer que les apports au sol en 2003 étaient grossièrement équivalents à ceux de 2004 (Figure 31). Les quantités de matière organique d'origine fécale résiduelles mesurées en 2004 et 2005 diffèrent selon les strates et les sites et rendent les comparaisons par année ardues (Figure 33).

Considérant la **pluviométrie utile** totale moyennée sur les trois sites, la meilleure année est 2004 et la plus sèche 2005, mais remarquons que la valeur de 2004 est élevée à cause de la pluviométrie importante à Kodey cette année-là. En 2004, le total de pluviométrie

utile était en fait plus faible qu'en 2005 à Banizoumbou et à Bagoua (Figure 26). Les rendements moyens en paille et en grain augmentent selon la pluviométrie utile mais cette augmentation est plus faible à Kodey (Figure 55). Ceci s'explique par la pluviométrie utile très élevée obtenue dans ce site en 2004 (534 mm) due à un événement pluvieux de 96 mm le 20 juin et qui ne génère des rendements que de 1540 kg paille ha⁻¹ et 654 kg grain ha⁻¹, dus à plusieurs périodes de sécheresse en cours de saison.

La **durée du cycle cultural** ne possède pas d'influence visible sur les rendements (Figure 56). Ceci reflète le fait que les variétés testées sont faiblement photosensibles, avec une durée de cycle peu variable.

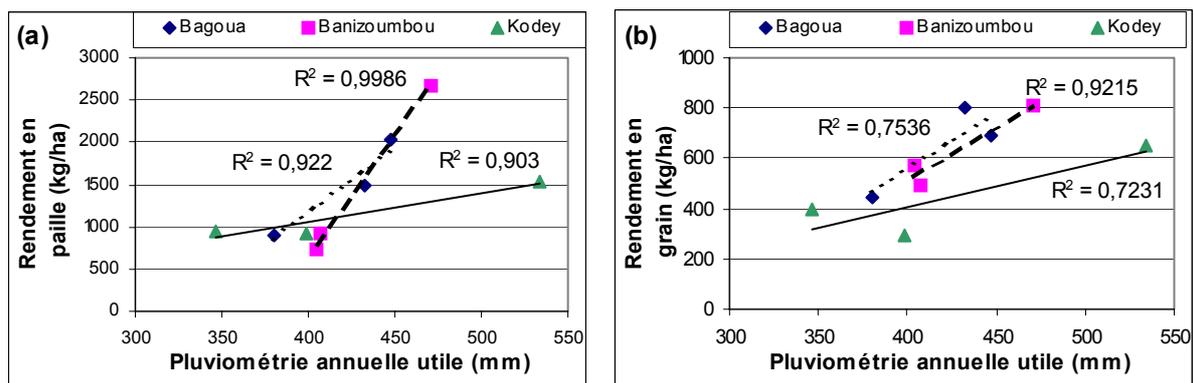


Figure 55. Rendements moyens en paille (a) et en grain (b) en fonction du site et de la pluviométrie utile annuelle

Equations de régression : (a) $y = 15,6x - 5096,7$ (Bagoua), $y = 28,6x - 10761,0$ (Banizoumbou), $y = 3,4x - 305,8$ (Kodey) ; (b) $y = 4,6x - 1275,8$ (Bagoua), $y = 4,3x - 1206,1$ (Banizoumbou), $y = 1,6x - 249,8$ (Kodey)

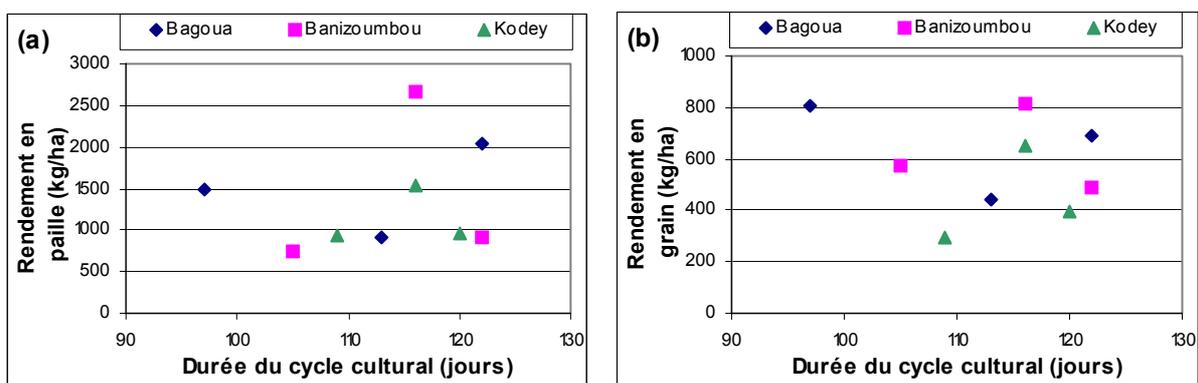


Figure 56. Rendements moyens en paille (a) et en grain (b) en fonction du site et de la durée du cycle cultural

La Figure 57 présente les rendements en paille et en grain en fonction de la pluviométrie utile annuelle dans chaque site, pour les parcelles « témoin + NF ». Les parcelles non fertilisées à l'engrais et non fumées donnent les plus faibles rendements et ceux-ci augmentent avec la pluviométrie utile. Nous rejoignons ici Subbarao et al. (2000) qui ont montré que les rendements des parcelles sans intrants étaient plus stables face à la pluviométrie que les parcelles traitées par application d'engrais ou de fumure. Cette stabilité est connue par les agriculteurs et réduit la fréquence d'échec de la culture en cas de sécheresse.

L'application de 2 g de DAP par poquet correspond à 4 kg P ha⁻¹ et à 3,6 kg N ha⁻¹. Nous avons mesuré environ 4500 kg ha⁻¹ de MOF résiduelle dans les strates PA. L'apport de fumier à un taux de 5000 kg MS ha⁻¹ correspond à un apport en nutriments de 71 kg N et 9 kg P ha⁻¹ (de Rouw et Rajot, 2004). La différence d'apport en N et P explique que les rendements des strates PA soient toujours supérieurs aux rendements des strates NF, même avec application de DAP (Figure 58).

Lorsque la pluviométrie utile augmente, les rendements augmentent plus dans les parcelles où un parage a été réalisé dans l'année (« Témoin + PA » et « DAP + PA ») que dans les parcelles où DAP a été appliqué seul (« DAP + NF ») (Figure 58 et Tableau 40). Les parcelles « DAP + NF » montrent une différence de rendement très stable avec les parcelles « Témoin + NF » en fonction de la pluviométrie. La réponse à la fertilisation est conditionnée par la disponibilité en eau, tout comme l'ont démontré de nombreux auteurs (Bationo et al., 2003). Cette tendance est particulièrement marquée à Banizoumbou. La pente d'augmentation de rendement en fonction de la pluviométrie est légèrement plus élevée dans les parcelles « Témoin + PA » que dans les parcelles « DAP + PA » à Banizoumbou et à Kodey tandis que l'effet inverse est noté à Bagoua (Tableau 40). A Banizoumbou, le parage seul permet clairement d'obtenir des rendements plus élevés que le parage avec application de DAP aux pluviométries les plus élevées.

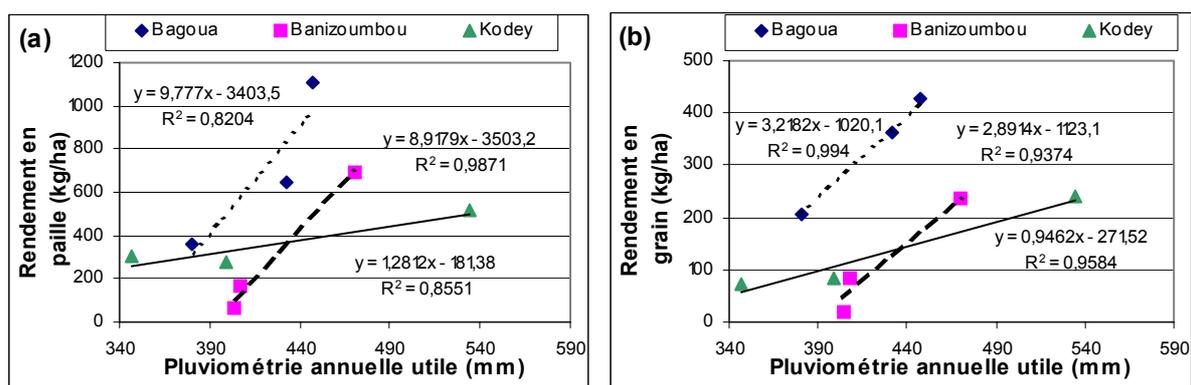


Figure 57. Rendements moyens en paille (a) et en grain (b) des parcelles sans engrais et de strate non fumée (Témoin + NF) en fonction du site et de la pluviométrie utile annuelle

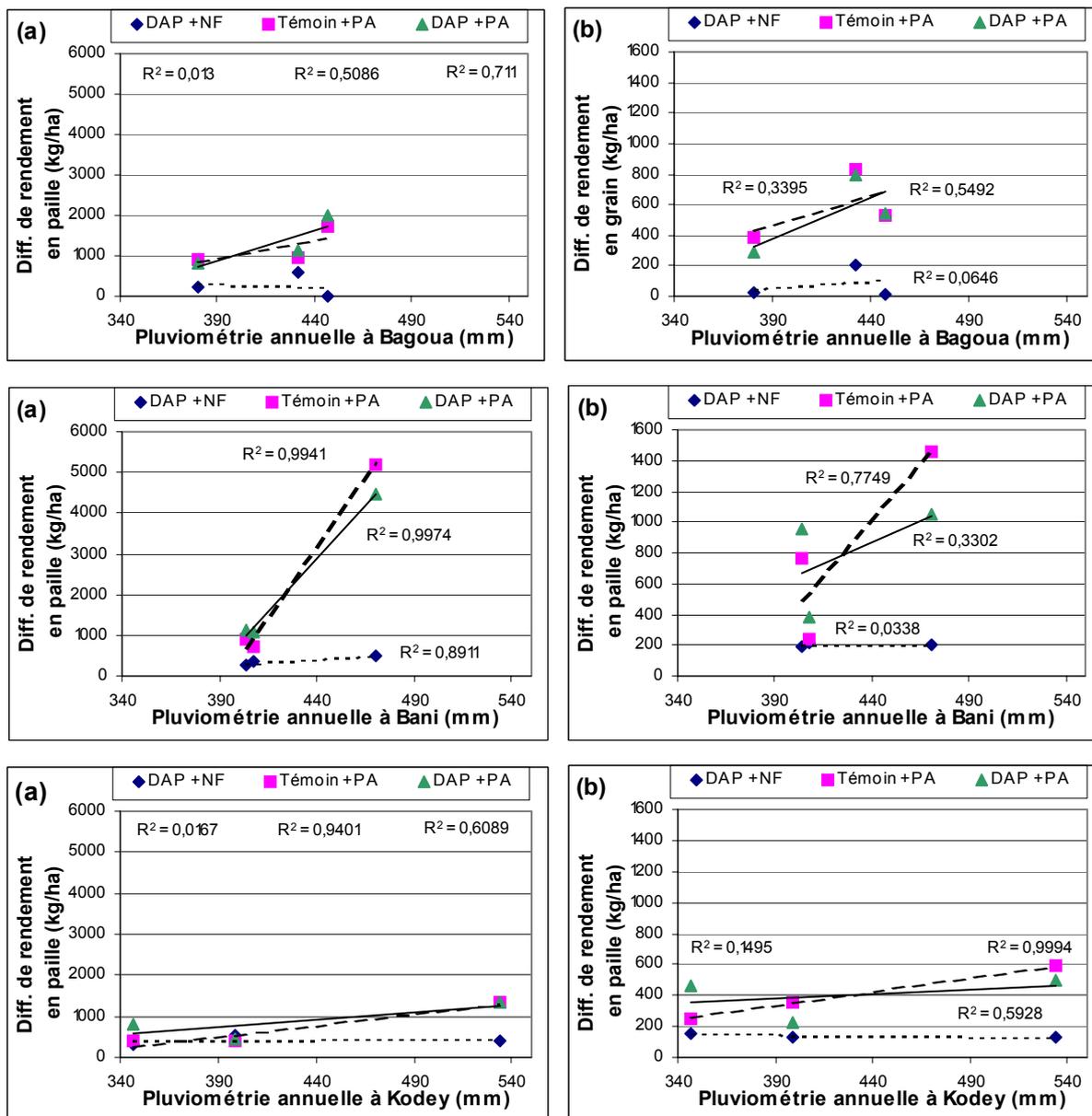


Figure 58. Différence entre rendements moyens en paille (a) et en grain (b) de traitements choisis et rendements des parcelles sans engrais et de strate non fumée (Témoin + NF) en fonction du site et de la pluviométrie utile annuelle

Tableau 40. Régressions linéaires relatives aux graphes de la Figure 58

Site	Traitement	Rendement en paille		Rendement en grain	
		Intercept	Pente	Intercept	Pente
Bagoua	DAP + NF	669,3	-0,9	-255,1	0,8
	Témoin + PA	-2562,7	9,0	-998,5	3,8
	DAP + PA	-4886,2	14,8	-1706,6	5,3
Banizoumbou	DAP + NF	-829,7	2,9	232,1	0,1
	Témoin + PA	-26554,0	67,4	-5301,5	14,3
	DAP + PA	-20069,0	52,2	-1567,0	5,5
Kodey	DAP + NF	340,6	0,2	193,1	-0,1
	Témoin + PA	-1559,3	5,3	-364,8	1,8
	DAP + PA	-720,7	3,7	148,1	0,6

Le **taux de survie** au démariage est plus élevé en moyenne en 2005 tandis que le taux de survie à la récolte a été en moyenne meilleur en 2003, puis en 2005 qu'en 2004 (Tableau 41). Nous constatons qu'en 2003, une période de sécheresse la deuxième quinzaine de juillet dans tous les sites a eu un impact négatif sur l'installation des plantules et le taux de survie au démariage. La Figure 59 indique que globalement, le taux de survie au démariage diminue en fonction du total de pluviométrie jusqu'à la date du démariage. Les taux de survie au démariage plus faibles pour des pluviométries élevées indiquent peut-être que les flux de N libérés lors de la première pluie (Bationo et Vlek, 1997) ont été rapidement lessivés par les pluies suivantes et que les plantules aient moins profité de cet apport initial en N.

Le taux de survie à la récolte n'est pas influencé par la pluviométrie utile totale mais il diminue en fonction de la différence de pluviométrie entre le démariage et la récolte. En outre, nous avons observé que le taux de survie à la récolte n'était pas influencé par la durée totale de stress hydrique (graphe non présenté). Rappelons que les périodes de stress hydrique ont été estimées de façon qualitative à partir de la pluviométrie et de l'eau utile disponible. D'autre part, il est évident que la durée totale de stress hydrique ne reflète pas la durée de chaque période sèche et la période à laquelle elle intervient.

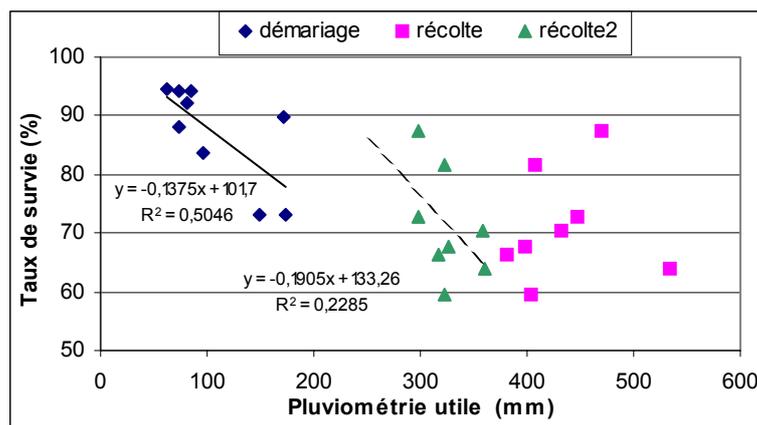


Figure 59. Taux de survie au démariage et à la récolte en fonction de la pluviométrie utile (démariage) (récolte) et en fonction de la différence de pluviométrie entre le démariage et la récolte (récolte2)

D'après de Rouw et Rajot (2004), le **nombre d'épis** est déterminé par les conditions de croissance pendant le tallage et l'initiation de la panicule, pendant la phase végétative (avant 50 JAS). Nous n'observons cependant pas de relation entre le nombre d'épis par poquet et le total de pluviométrie pendant la phase végétative (graphe non présenté).

D'après les mêmes auteurs, le **poids des grains** est le produit du nombre de grains, élaboré pendant la phase reproductive (entre 50 et 75 JAS) et le poids d'un grain, dépendant des conditions pendant la phase de remplissage des grains (après 75 JAS). Nous n'observons aucun lien entre le poids des grains par poquet et la pluviométrie totale pendant les phases reproductive et de remplissage des grains (graphe non présenté).

Le Tableau 41 indique que, malgré la sécheresse après semis, l'année 2004 montre le nombre d'épis par poquet et le poids des grains par épi les plus élevés. Ceux-ci ont compensé le faible taux de survie à la récolte et permis d'obtenir les rendements en grain les plus élevés.

Selon de Rouw et Rajot (2004), cela signifie que les conditions de croissance ont été plus favorables en fin de période végétative (fixation du nombre d'épis par poquet) et dans les phases reproductrice et de remplissage des grains (fixation de poids des grains par épi) qu'en début de cycle de croissance. Ceci est confirmé par le fait que Kodey ait subi une période sèche après semis et que les deux autres sites aient été (re)semés tardivement.

Tableau 41. Moyennes par année ($p < 0,0001$ pour toutes les variables)

Année	Rendement en paille (kg ha ⁻¹)	Rendement en grain (kg ha ⁻¹)	Taux de survie au démariage (%)	Taux de survie à la récolte* (%)	Poids des grains épi ⁻¹ (g)	Nombre de talles poquet ⁻¹	Nombre d'épis poquet ⁻¹ *	Poquets végétatifs *	Poquets non matures*
2003	1891	634	82	80	30,9	3,20	2,85	0,64	0,47
2004	1232	674	83	63	34,4	4,01	3,10	4,98	4,28
2005	957	423	95	72	21,0	3,54	2,82	3,90	2,80

*La moyenne de 2003 a été réalisée sur les sites de Bagoua et Banizoumbou uniquement

11.2. Effet du site

Les rendements moyens en paille et en grain diminuent dans le sens Bagoua > Banizoumbou > Kodey. La Figure 60 renseigne que cette moyenne n'est pas représentative des rendements obtenus chaque année qui dépendent entre autres de la pluviométrie et des apports en fumier effectués sur chaque site.

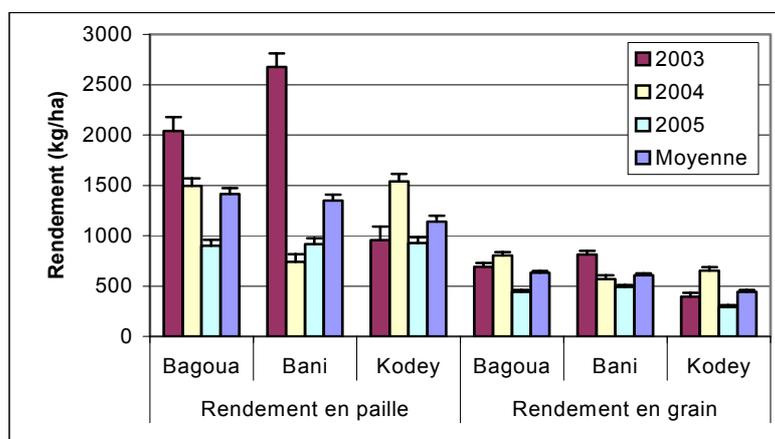


Figure 60. Rendements moyens en paille et en grain toutes années confondues et par site (barres d'erreur = s.e.d pour les comparaisons entre années)

Remarquons que l'effet du site est significatif sur toutes les variables mesurées excepté le nombre talles par poquet (Tableau 8-1, Annexe 8). En moyenne sur tous les ans, les **taux de survie au démariage** et **à la récolte** sont plus élevés à Banizoumbou qu'à Bagoua et à Kodey. Le **poids des grains moyen par épi** vaut 31 g à Bagoua, 27 g à Banizoumbou et 25 g à Kodey. Le **nombre d'épis par poquet** est lui aussi en moyenne plus élevé à Bagoua (3,03) qu'à Banizoumbou (2,76) et à Kodey (2,88). Rappelons que le site de Bagoua bénéficie d'une meilleure fertilité inhérente due à des parages effectués avant installation de l'essai. C_{org}, N total et P disponible dans l'échantillon de surface prélevé avant le début de l'essai y sont les plus élevés (Tableau 9).

Tableau 42. Récapitulatif des moyennes par année et par site

Année	Site	Taux de survie au démariage (%)	Taux de survie à la récolte (%)	Poids des grains épi ⁻¹ (g)	Nombre de talles poquet ⁻¹	Nombre d'épis poquet ⁻¹	Poquets végétatifs	Poquets non matures
2003	<i>Bagoua</i>	73	73	35,4	3,45	2,84	0,60	0,34
	<i>Banizoumbou</i>	90	88	30,8	3,42	2,86	0,67	0,60
	<i>Kodey</i>	84	*	26,4	2,75	*	*	*
	<i>p-valeur</i>	<,0001	<,0001	<,0001	<,0001	n.s.	/	/
	<i>s.e.d.</i>	1,4	1,7	0,90	0,113	0,091	/	/
2004	<i>Bagoua</i>	88	71	37,7	3,81	3,12	5,59	4,13
	<i>Banizoumbou</i>	92	59	29,5	3,52	2,93	8,20	6,23
	<i>Kodey</i>	73	64	34,7	4,57	3,19	1,54	2,06
	<i>p-valeur</i>	<,0001	<,0001	<,0001	<,0001	n.s.	/	/
	<i>s.e.d.</i>	1,2	1,7	0,85	0,122	0,109	/	/
2005	<i>Bagoua</i>	94	66	22,4	3,67	3,08	1,60	2,37
	<i>Banizoumbou</i>	94	82	22,9	3,76	2,54	2,02	0,56
	<i>Kodey</i>	94	68	17,5	3,17	2,61	8,04	5,81
	<i>p-valeur</i>	n.s.	<,0001	<,0001	<,0001	<,0001	/	/
	<i>s.e.d.</i>	0,4	1,2	0,59	0,106	0,065	/	/

Notons que la différence de rendements en grain entre 2003 et 2005 semble être causée principalement par la diminution importante du poids des grains par épi plutôt que par les autres facteurs (Tableau 42). La différence entre les rendements obtenus en 2005 et 2004 à Bagoua provient d'une diminution du poids des grains par épi et d'une baisse du taux de survie, tandis qu'à Kodey et à Banizoumbou les principales variables responsables de la baisse du rendement sont le poids des grains par épi et le nombre d'épis par poquet.

11.3. Analyse des parcelles « témoins »

Afin de mieux comprendre l'effet du site et l'effet de l'année sur les variables mesurées, nous nous sommes intéressé aux moyennes des parcelles de la strate NF (non fumées), non traitées par application d'engrais et avec la variété locale. Les moyennes représentées sont donc des moyennes sur 3 répétitions.

Sur les 121 poquets semés par parcelle, au moins 30 % meurent et moins de 50 % portent des épis fertiles et peuvent être récoltés (Figure 61). Le nombre de poquets survivants particulièrement faible à Banizoumbou en 2004 pourrait être expliqué par le retard de semis. La majorité du flux d'azote libéré par la forte minéralisation en début de saison des pluies (Bationo et Vlek, 1997) a sans doute été perdue par lessivage avant le semis. Ceci peut avoir eu pour conséquence un développement moins vigoureux des plantules et une plus grande sensibilité à la sécheresse.

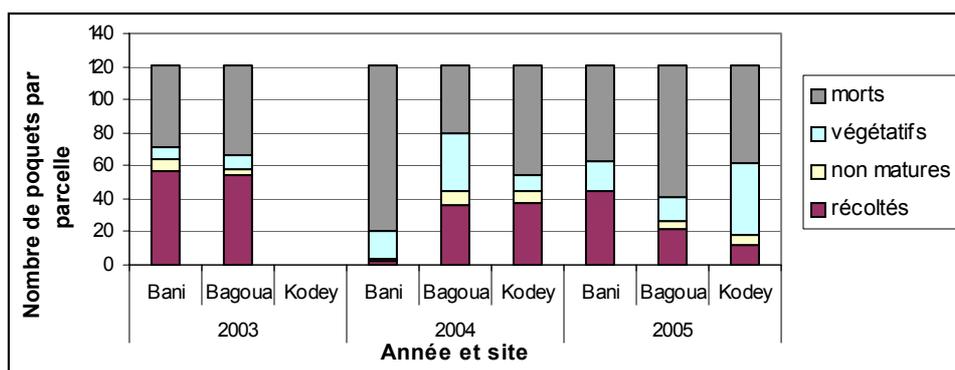


Figure 61. Nombre de poquets morts, végétatifs, non matures et récoltés dans les parcelles non fumées, non fertilisées par engrais et de variété locale

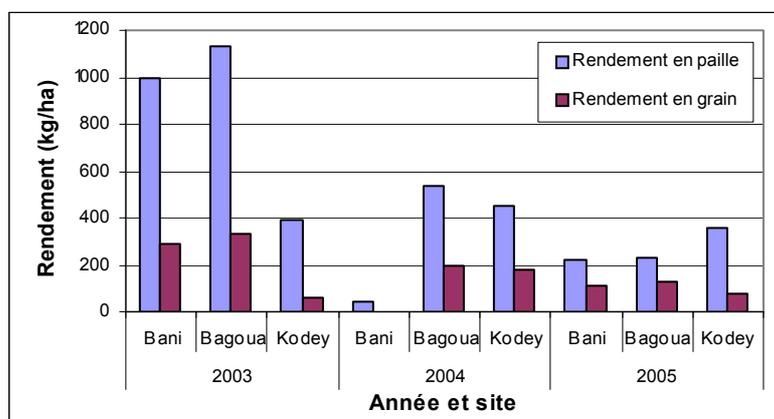


Figure 62. Rendements moyens dans les parcelles non fumées, non fertilisées par engrais et de variété locale

D'autre part, les rendements des parcelles diminuent au fil des ans (Figure 62). Sans apport de fertilisants organiques ou inorganiques, les bilans en éléments nutritifs dans les sols sahéliens deviennent de plus en plus négatifs (Bationo et al., 1998 ; Gandah et al., 2003). Plusieurs études remarquent également une baisse rapide des rendements sur les parcelles sans intrants. Buerkert et Lamers (1999) rapportent une baisse significative des rendements après trois ans d'essai même avec application d'engrais inorganique. Cette baisse pourrait être due en partie à l'acidification du sol qui induirait une fixation accrue du P (Michels et Biielders, 2006).

En 2003, contrairement à la pluviométrie, les rendements sur les parcelles témoins sont plus élevés à Bagoua qu'à Banizoumbou. Ceci est expliqué par l'effet de fertilité résiduelle provenant de parcsages antérieurs à l'installation de l'essai à Bagoua. Les taux de survie à la récolte et le nombre d'épis par poquet sont plus importants à Banizoumbou qu'à Bagoua tandis que le poids des grains par épi est supérieur à Bagoua (Figure 63). Les rendements en grain les plus élevés observés à Bagoua sont expliqués essentiellement par le poids des grains par épi plus élevé.

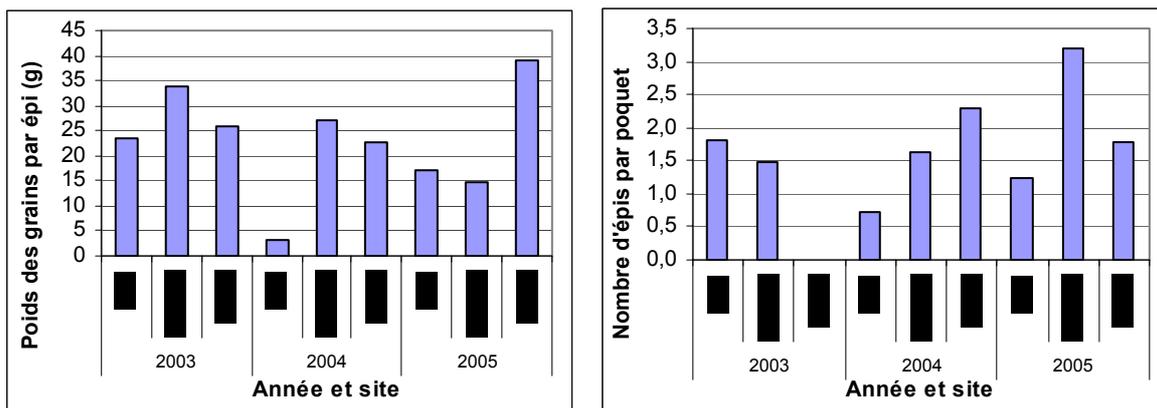


Figure 63. Poids des grains par épi et nombre d'épis par poquet* dans les parcelles non fumées, non fertilisées par engrais et de variété locale (*non mesuré à Kodey en 2003)

En 2004, la pluviométrie est la plus faible à Banizoumbou et le semis a été tardif, ce qui explique les rendements extrêmement faibles observés sur les parcelles témoins (Figure 62). Les meilleurs rendements sont notés à Bagoua, malgré que Kodey bénéficie d'une pluviométrie utile plus importante. Le taux de survie à la récolte décroît selon la séquence : Kodey > Bagoua > Banizoumbou. Notons que le nombre d'épis par poquet est également meilleur à Kodey qu'à Bagoua. Quand au nombre de plants végétatifs et non matures, il est beaucoup plus élevé à Bagoua qu'à Kodey (Figure 61). Les meilleurs rendements atteints à Bagoua proviennent à nouveau du poids des grains par épi dans ce site. Les rendements à Bagoua s'expliquent plus par la fertilité résiduelle du site que par la pluviométrie. La pluviométrie en 2003 et 2004 est peu différente dans ce site mais les rendements en paille et en grain diminuent de 42 % et 52 % par rapport à 2003. Cette baisse de rendement pourrait provenir de l'épuisement progressif du sol en éléments nutritifs. L'acidification promeut l'adsorption de P par les oxy-hydroxydes, ce qui peut conduire à une réduction supplémentaire de la disponibilité en P pour le mil (Bationo et al., 1990, cité par Bielders et al., 2002).

En 2005, les rendements en paille sont les plus élevés à Kodey et les plus faibles à Banizoumbou. Les rendements en grain suivent la séquence : Bagoua > Banizoumbou > Kodey (Figure 62). Le taux de survie à la récolte augmente avec la pluviométrie plus importante à Banizoumbou et la plus faible à Kodey. Le poids des grains par épi est le plus élevé à Kodey mais le faible taux de survie et nombre d'épis par poquet donnent un rendement en grain inférieur aux autres. Malgré que le taux de survie soit plus élevé à Banizoumbou, le rendement en grain est supérieur à Bagoua grâce à son nombre d'épis par poquet plus élevé.

Le site de Bagoua bénéficie donc d'un avantage lié à des pratiques de gestion de la fertilité antérieures à l'installation de l'essai et à la fertilité inhérente du sol légèrement meilleure que dans les autres sites (au niveau de C_{org} , N total et P disponible dans l'échantillon de surface).

11.4. Effet de la strate de fertilité

L'effet de la strate est significatif sur toutes les variables mesurées ($p < 0,0001$). Les rendements décroissent selon la séquence : $PA > PA-1 \cong FT \cong PA-2 > FT-1 > FT-2 \cong NF$ (Figure 64). Les rendements des parcelles parquées dans l'année augmentent de 179 % en paille et de 168 % en grain par rapport aux rendements de la strate non fumée. La technique du transport de fumier permet de doubler les rendements comparée aux parcelles non fumées (augmentations de 101 % en paille et 97 % en grain dans la strate FT). Le parcage conserve des effets bénéfiques sur les rendements deux ans après application.

De Rouw et Rajot (2004) notent que l'application de fumier à $5000 \text{ kg MS ha}^{-1}$ correspondent approximativement à un apport de 71 kg N , 9 kg P et 40 kg K ha^{-1} . Le N et P apportés par l'application de fumier permettent d'augmenter les rendements en grain en stimulant le tallage et augmentant le nombre de panicules (de Rouw, 2004) ainsi qu'en favorisant le remplissage précoce des grains (Muehlig-Versen et al., 2003). L'apport de fumier récent favorise également le développement racinaire (Michels et Biolders, 2006) et permet une croissance initiale des feuilles plus rapide, ce qui permet d'augmenter l'efficacité de l'utilisation d'eau et la productivité (Bationo et al., 1998 ; Shapiro et Sanders, 1997).

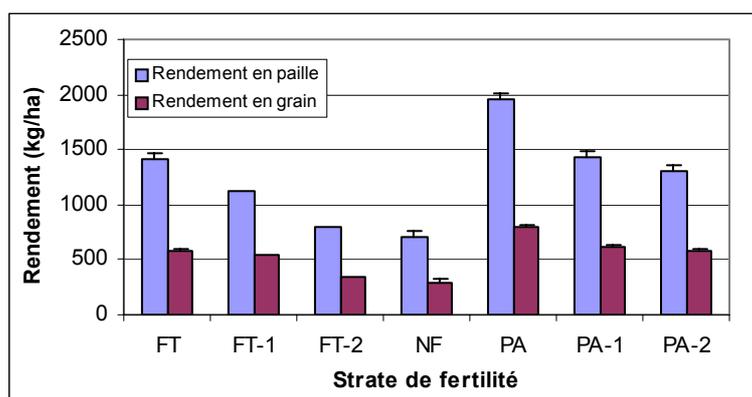


Figure 64. Rendements moyens toutes années confondues par strate de fertilité (barres d'erreur = s.e.d. sauf FT-1 et FT-2)

Nous remarquons que la différence entre les rendements obtenus dans les strates PA et PA-1 est en moyenne plus élevée que celle existant entre les strates PA-1 et PA-2. Cela peut être expliqué par la disparition rapide de l'urine et la vitesse de décomposition exponentielle de la partie facilement minéralisable de la MO apportée au sol. Powell et al. (1996) notent que approximativement 50 % de N excrété par les animaux est présent dans l'urine mais les pertes en N peuvent être substantielles et rapides (lessivage, dénitrification et surtout volatilisation de NH_3) si N n'est pas utilisé par les plantes. L'urine constitue une source de N et K et elle permet d'augmenter la disponibilité de P du sol (Powell et Valentin, 1997). Powell et Valentin (1997) rapportent que le P contenu dans le fumier minéralise plus rapidement dans le sol que le P de la biomasse végétale. Les taux de décomposition de la MO diminuent avec le temps car les composants restants sont plus chargés en lignine et en polyphénols et sont plus

difficiles à minéraliser (Esse et al., 2000). Les résidus de matière organique au sol se décomposent plus lentement après la première année et les apports en minéraux disponibles pour les plantes diminuent, ce qui explique la baisse de rendement progressive observée.

La strate PA permet en moyenne d'obtenir des rendements supérieurs à la strate FT. Ceci pourrait s'expliquer d'une part par les quantités de fumier appliquées, qui sont mal connues. D'autre part, le fumier de parage est de meilleure qualité que le fumier transporté. Il contient de l'urine et des déjections tandis que le fumier transporté est « coupé » par des déchets ménagers, des cendres et des résidus végétaux. Le taux de N dans le fumier transporté est souvent plus faible que dans le fumier de parage, le NH_3 présent dans l'urine étant le plus souvent perdu par volatilisation avant même l'épandage du fumier transporté (Esse et al., 2001).

Contrairement aux strates de parquées, la différence entre les rendements obtenus dans les strates FT-1 et FT-2 est en moyenne supérieure à celle existant entre les strates FT et FT-1. Rappelons cependant qu'une strate de fumier transporté est ajoutée par an à l'essai et que FT-1 est la moyenne entre 2004 et 2005 tandis que FT-2 ne concerne que 2005. Les comparaisons concernant les strates FT-1 et FT-2 sont donc biaisées car les échantillons ne possèdent pas le même nombre d'effectifs.

Les Figure 65 et Figure 66 illustrent la distribution des rendements en fonction des quantités de MOF mesurées au sol. Notons que les strates parquées dans l'année forment un cluster isolé caractérisé par les plus hautes valeurs de MOF. Nous ne constatons cependant pas de corrélation graphique claire. L'analyse des corrélations entre variables n'avait relevé qu'une corrélation dont le coefficient était supérieur à 0,5 entre quantité de MOF et rendement en grain : à Banizoumbou en 2004. Les mesures de MOF résiduelles ne sont que des estimateurs imparfaits de la quantité réelle de fumier apportée dans chaque strate et de la quantité réelle de matière organique et d'éléments assimilables par le mil présents dans le sol, particulièrement dans les strates PA-1 et PA-2.

Il est donc difficile de comparer les doses de fumier appliquées dans cet essai aux doses recommandées par la littérature. L'apport de 18 000 kg de fumier dans les strates FT et PA en 2005 à Kodey donne des indications importantes. Lors de la mesure au plateau environ 3 mois après application du fumier, seulement 4700 kg MOF ha^{-1} des 18000 kg fumier ha^{-1} initiaux subsistent en PA05 et seulement 500 kg MOF ha^{-1} en FT05. Le parage de l'année apporte au moins 4500 kg MOF ha^{-1} (Figure 65 et Figure 66), mais probablement beaucoup plus si l'on se base sur les vitesses de disparition du fumier appliqué en 2005 à Kodey (disparition de 74 % du fumier appliqué par parage et de 97 % du fumier transporté entre le moment de l'apport et la date de mesure des doses résiduelles). Les doses de fumier appliquées seraient alors très élevées (environ 18000 kg fumier ha^{-1}) par rapport aux quantités recommandées par différents auteurs. Les quantités recommandées citées par de Rouw et Rajot (2004) pour une production durable de mil varient de 5000 kg MS ha^{-1} par année après une période de jachère, 9000 kg MS ha^{-1} tous les 3 ans et 2100 à 3200 kg MS ha^{-1} tous les 2 ans tandis que Brouwer et Powell (1998) recommandent une application de 2500 kg MS ha^{-1} par an.

Les mesures de MOF sous-estiment donc fortement les quantités de fumier appliquées dans l'année. Il est probable qu'une partie des nutriments présents dans le fumier soit perdue par lessivage, surtout les années de bonne pluviométrie. Plusieurs auteurs conseillent, si le fumier est disponible, de diminuer les taux d'application pour augmenter l'aire traitée et donc augmenter les rendements sur une plus grande superficie tout en réduisant le risque de lessivage (Gandah et al., 2003 ; Esse et al., 2001).

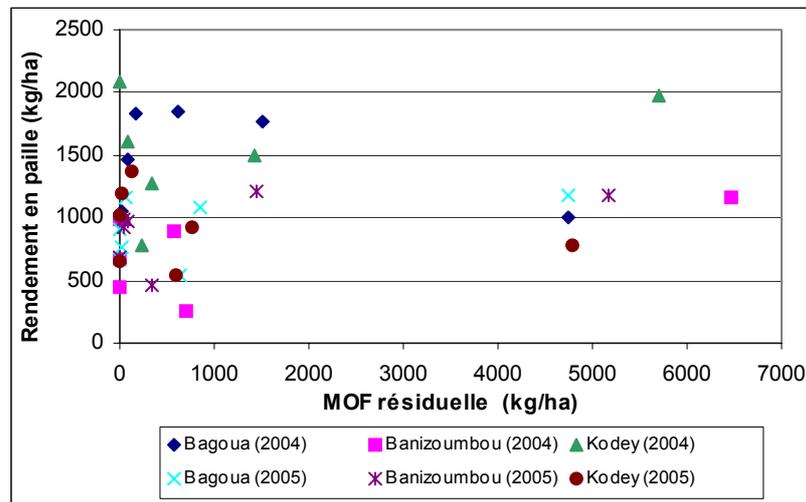


Figure 65. Rendements moyens en paille en fonction de la MOF résiduelle mesurée. Chaque point représente une moyenne par strate.

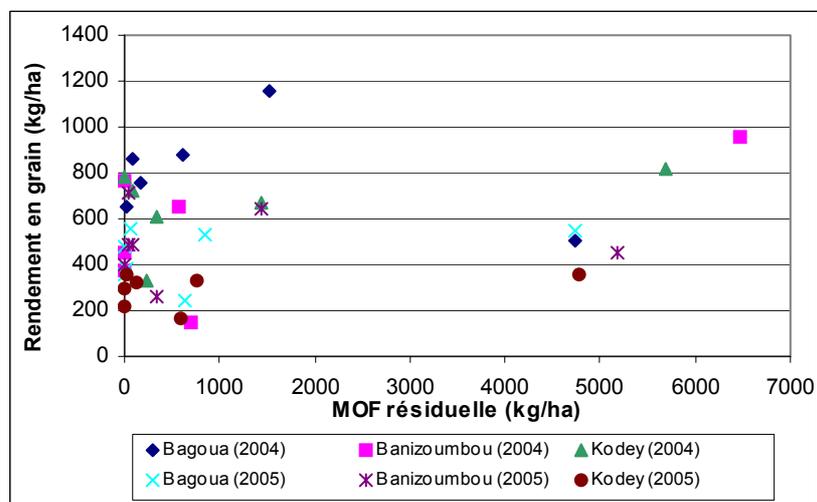


Figure 66. Rendements moyens en grain en fonction de la MOF résiduelle mesurée. Chaque point représente une moyenne par strate.

Le Tableau 43 indique que le nombre d'épis par poquet et le poids des grains par épi suivent la même évolution que les rendements, ainsi que, dans une moindre mesure le taux de survie à la récolte. Notons que la pratique du parcage permet d'améliorer les taux de survie à la récolte. Ceci est dû essentiellement à un taux de survie plus élevé entre le démariage et la récolte, plutôt qu'à une meilleure levée des plantules. L'application de fumier permet d'augmenter le nombre d'épis par poquet et le poids des grains par épis, favorisant par là un meilleur rendement en grain. Ceci concorde en partie avec les observations de de Rouw et

Rajot (2004) qui notent que l'effet positif du fumier se marque par une stimulation du tallage et une augmentation du nombre de panicules plutôt que par des augmentations des autres composantes du rendement. Rappelons que dans cet essai, l'effet de la strate de fertilité sur le nombre d'épis par poquet n'a été significatif qu'en 2005.

Le nombre de poquets non matures ou végétatifs diminue pour les parcelles les plus récemment fumées. Cette observation est confirmée par les études montrant que l'application de N et de P stimule le tallage, la floraison hâtive et la fertilité des talles (Winkel et Do, 1992 ; Winkel et al., 1997).

Tableau 43. Moyennes par strate de fertilité toutes années confondues

Strate	Taux de survie au démarrage (%)	Taux de survie à la récolte (%)	Nombre de talles poquet ⁻¹	Nombre d'épis poquet ⁻¹	Poids des grains épi ⁻¹ (g)	Poquets végétatifs	Poquets non matures
FT	84	73	3,85	2,96	29,3	1,29	2,03
FT-1*	93	71	3,62	2,81	26,6	4,48	3,09
FT-2*	94	72	3,5	2,48	20,5	4,51	3,65
NF	87	60	2,82	2,31	23,2	8,41	4,48
PA	90	79	3,87	3,33	31,1	1,29	1,45
PA-1	86	72	3,78	3,15	30,0	1,28	2,36
PA-2	86	70	3,6	2,9	29,8	5,17	3,54
s.e.d.	0,9	1,6	0,098	0,084	0,66	/	/

* Etant donné qu'une strate de fumier transporté est ajoutée par an, FT-1 est la moyenne entre 2004 et 2005, FT-2 ne concerne que 2005 et les s.e.d. ne s'appliquent pas sur ces deux strates.

11.5. Effet de l'engrais chimique

L'application de 2 g de DAP par poquet correspond à un taux de 20 kg DAP ha⁻¹, c'est-à-dire à 4 kg P ha⁻¹ et à 3,6 kg N ha⁻¹. L'application d'un gramme d'urée chimique supplémentaire par poquet correspond à une application supplémentaire de 4,6 kg N ha⁻¹.

L'effet de l'application d'engrais est significatif sur toutes les variables mesurées. L'application de DAP + urée permet d'augmenter les rendements de 24 % en paille et de 19 % en grain tandis que l'application de DAP permet des augmentations de 18 % en paille et de 15 % en grain par rapport aux parcelles témoins (Figure 67). La différence de rendement entre l'application de DAP + urée et DAP n'est cependant pas significative, nous conseillons donc l'application de DAP seul plutôt que de DAP + urée.

Dans l'analyse combinée sur 3 ans, les comparaisons entre DAP + urée et DAP ne sont jamais significatives pour toutes les variables mesurées. L'application d'engrais montre un effet bénéfique sur toutes les variables par rapport aux parcelles témoins (Tableau 44).

Tableau 44. Moyennes par niveau de fertilisation toutes années confondues

Fertilisation	Taux de survie au démarrage (%)	Taux de survie à la récolte (%)	Nombre de talles poquet ⁻¹	Nombre d'épis poquet ⁻¹	Poids des grains épi ⁻¹ (g)	Poquets végétatifs	Poquets non matures
DAP	86	72	3,68	2,95	28,5	2,10	2,36
DAP + urée	87	73	3,74	2,98	28,7	2,20	2,39
Témoin	90	68	3,33	2,73	26,9	6,72	3,84
s.e.d.	0,7	1,2	0,077	0,065	0,52	/	/

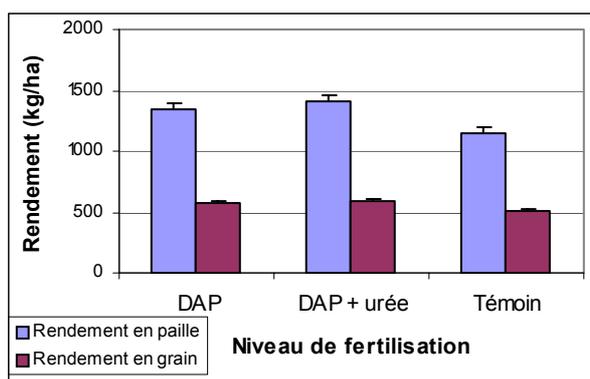


Figure 67. Rendements moyens toutes années confondues par niveau de fertilisation (barre d'erreur = s.e.d.)

11.6. Interaction strate de fertilité organique × fertilisation inorganique

L'interaction strate × fertilisation est significative pour les rendements en grain ($p = 0,019$) (Figure 68) dans l'analyse combinée sur 3 ans. Rappelons ici que dans l'analyse par année, cette interaction n'était pas significative pour les rendements en paille et en grain de 2003, mais bien pour 2004 et 2005.

Dans la strate PA, nous constatons que les parcelles témoins obtiennent des rendements légèrement supérieurs à ceux des parcelles traitées par DAP (Figure 69). Dans les autres strates, les parcelles témoins obtiennent des rendements légèrement inférieurs, voire très inférieurs (NF et PA-2) à ceux des parcelles traitées par DAP. L'effet de DAP sur les rendements est d'autant plus marqué que le parage et le transport de fumier sont anciens. Cet effet est en partie masqué par l'effet important du fumier dans les strates de fumure récente. Les strates FT-1 et FT-2 ne concernant pas les 3 années de l'essai, nous ne discuterons cependant pas ici des effets résiduels du fumier transporté.

En se basant sur une augmentation de rendement dont le seuil serait fixé à 100 kg ha^{-1} , les résultats indiquent que les agriculteurs ne gagneraient à appliquer DAP placé au poquet comme apport-relai en nutriments supplémentaire qu'à partir de la 1^{ème} année après le parage ou sur des champs non fumés uniquement (Figure 69). D'autre part, les effets du parage sur le rendement en grain sont encore importants un et deux ans après application, les strates PA-1 et PA-2 produisent 208 et 192 % du rendement de la strate non fumée (298 kg ha^{-1}) (Figure 64). Nous conseillons donc de réserver l'application d'engrais aux parcelles fumées depuis plus de 2 ans, voire 3 ans.

L'interaction strate × fertilisation est également significative pour le taux de survie à la récolte ($p < 0,0001$). L'application d'engrais permet d'augmenter significativement le taux de survie à la récolte uniquement dans les parcelles n'ayant pas reçu de fumier (NF) ou dans les strates de fumure ancienne (FT-1, FT-2 et PA-2) (graphe non présenté).

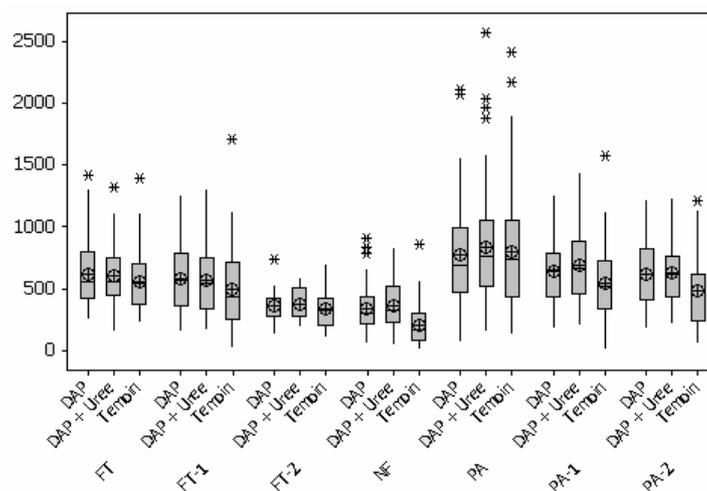


Figure 68. Graphe « boxplot » du rendement en grain moyen de 2003 à 2005 (kg ha^{-1}) illustrant l'interaction strate x fertilisation

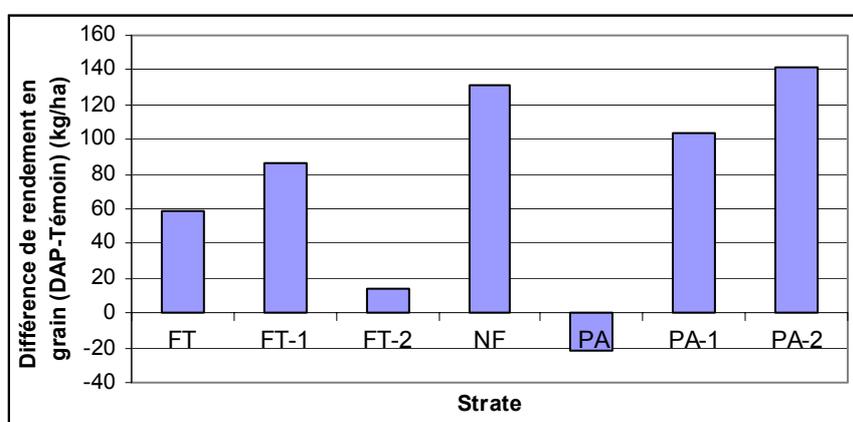


Figure 69. Différence de rendement en grain par strate entre parcelles témoins et fertilisées par DAP

11.7. Effet de la variété

L'effet de la variété est significatif pour toutes les variables mesurées. La variété locale permet d'obtenir les plus grands rendements en paille. Les rendements obtenus par les variétés Zatib et ICMV ne diffèrent pas significativement, ils valent 84 % et 89 % des rendements en paille de la variété locale. La variété ICMV permet une augmentation du rendement en grain de 12 % par rapport au rendement de la variété locale. Malgré sa résistance au mildiou, la variété Zatib offre un rendement en grain valant 97 % du rendement de la variété locale, mais la différence n'est pas significative.

Les variétés améliorées ont un effet significatif sur les indices de récolte, ils valent en moyenne 29,2 , 27,4 et 25,4 % pour les variétés ICMV, Zatib et locale, respectivement (s.e.d. = 0,41 %). Les taux de survie au démariage et à la récolte suivent la même évolution que les indices de récolte, mais les comparaisons entre variétés ICMV et Zatib ne sont pas significatives (Tableau 45). Le nombre moyen de talles par poquet est plus élevé pour la variété locale que pour les variétés améliorées tandis que le nombre d'épis par poquet est plus

élevé pour les variétés ICMV et locale (non statistiquement différentes) que pour la variété Zatif. Le poids des grains par épi est par contre plus élevé chez la variété locale que chez les variétés améliorées.

La variété ICMV, possédant à la fois le meilleur taux de survie à la récolte et le meilleur nombre d'épis par poquets, atteint les meilleurs rendements en grain. La variété locale donne le second rendement en grain principalement grâce au poids élevé des grains par épi. Enfin, le nombre de poquets végétatifs et non matures est plus important pour la variété locale, les variétés améliorées possédant des avantages en terme de résistance face aux insectes et aux maladies.

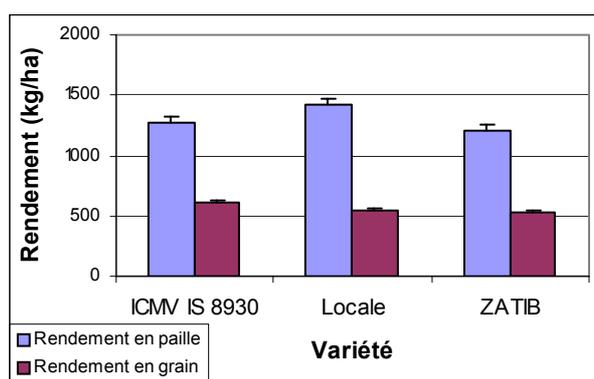


Figure 70. Rendements moyens par variété (barre d'erreur = s.e.d.)

Tableau 45. Moyennes par variété toutes années confondues

Variété	Taux de survie au démarrage (%)	Taux de survie à la récolte (%)	Nombre de talles poquet ¹	Nombre d'épis poquet ¹	Poids des grains épi ¹	Poquets végétatifs	Poquets non matures
ICMV IS 89305	90	76	3,52	2,94	27,6	3,33	2,90
Locale	84	63	3,88	2,94	30,5	4,06	3,33
ZATIB	89	74	3,36	2,78	26,0	3,63	2,37
s.e.d.	0,7	1,2	0,077	0,065	0,52	/	/

Les Figure 71 et Figure 72 renseignent que, à même pluviométrie utile, la variété ICMV offre des rendements en paille et en grain toujours plus élevés que la variété ICMV (excepté pour la pluviométrie de 471 mm à Banizoumbou en 2003). Remarquons que si l'on écarte la pluviométrie élevée obtenue à Kodey en 2004 (534 mm), l'écart de rendement en paille entre la variété locale et les autres variétés augmente avec la pluviométrie (Figure 73). La pente est plus négative pour la variété Zatif, indiquant que celle-ci obtient des rendements de plus en plus inférieurs à ceux de la variété locale lorsque la pluviométrie utile annuelle augmente. Nous n'observons aucun lien entre la pluviométrie et les rendements en grain des différentes variétés (Figure 72).

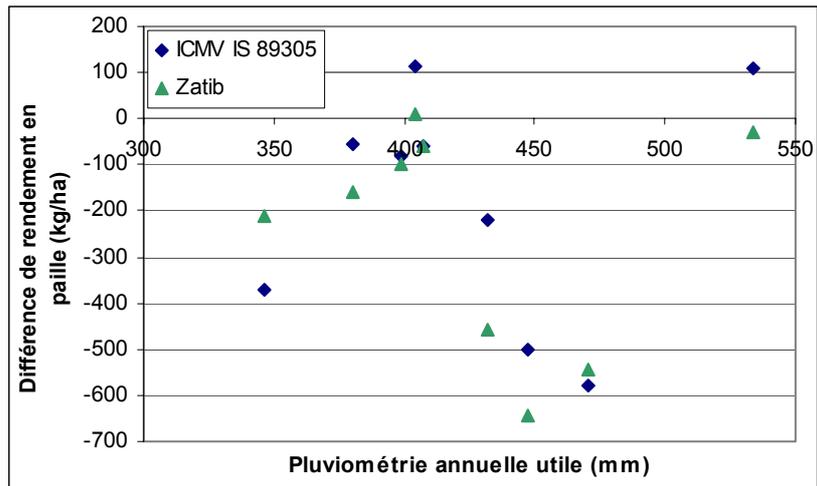


Figure 71. Différence de rendement en paille avec la variété locale en fonction de la pluviométrie annuelle utile

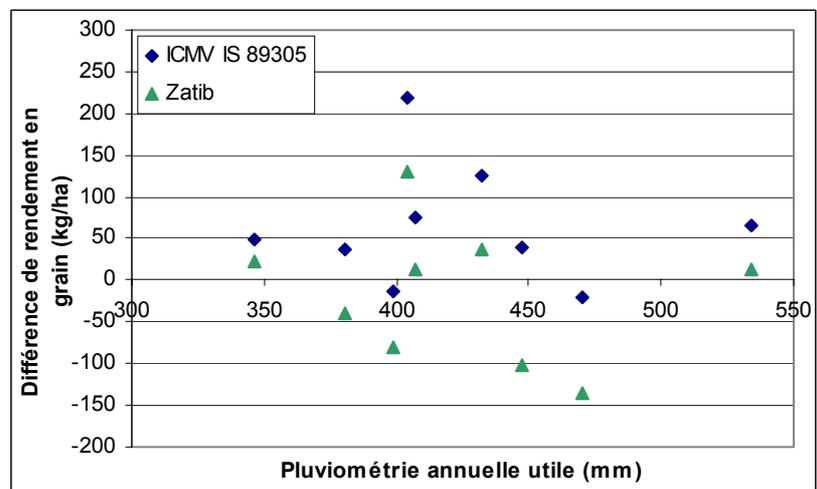


Figure 72. Différence de rendement en grain avec la variété locale en fonction de la pluviométrie annuelle utile

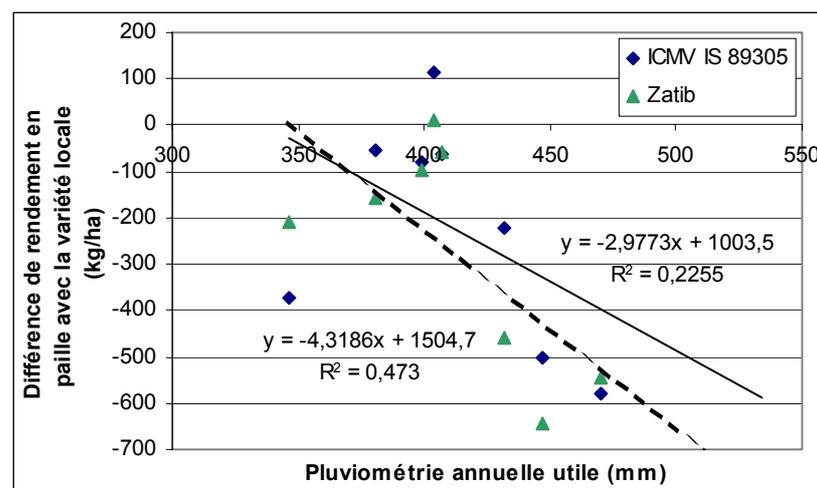


Figure 73. Différence de rendement en paille avec la variété locale en fonction de la pluviométrie annuelle utile (sans la pluviométrie à Kodey en 2004)

Conclusions

L'analyse des résultats de l'essai par année et toutes années confondues permet de surligner les pratiques permettant d'obtenir les meilleurs rendements en grain et paille de mil.

Dans cet essai, **les pratiques de gestion de la fertilité organique** (parcage et transport de fumier) réalisées avant la saison de culture permettent d'obtenir les meilleurs rendements.

Les rendements des parcelles où un parcage a été effectué dans l'année augmentent de 168 % (en grain) et de 176 % (en paille) par rapport aux parcelles non fumées. La technique du transport de fumier permet de doubler les rendements en paille et en grain comparé aux parcelles non fumées. Ceci résulte dans les deux cas d'une augmentation du nombre d'épis par poquet et du poids des grains par épi. La pratique du parcage permet en outre d'améliorer les taux de survie à la récolte par rapport aux parcelles non fumées et aux parcelles traitées par fumier transporté.

Nous attribuons les différences de rendements entre le parcage et le fumier transporté à la qualité du fumier plutôt qu'à leurs doses d'application. Le fumier de parcage est plus riche en P et N que le fumier transporté qui est « coupé » par des déchets ménagers, des cendres, des résidus végétaux et dont le NH₃ présent dans l'urine est le plus souvent perdu par volatilisation avant l'épandage.

Nous avons relevé un effet résiduel significatif du parcage sur les rendements en paille et en grain pendant trois saisons de culture consécutives. L'effet résiduel de la pratique de transport de fumier est également présent, au moins jusqu'à la deuxième saison de culture. L'effet résiduel du parcage vieux d'un an et de 2 ans n'est pas significativement différent de l'effet du transport de fumier effectué dans l'année.

D'autre part, les taux d'application du fumier ont été estimés à 18 t ha⁻¹ en 2004 et 2005. Il est donc probable qu'une partie des nutriments présents dans le fumier ait été perdue par lessivage. Nous conseillons, si le fumier est disponible, de diminuer les taux d'application pour augmenter l'aire traitée et d'augmenter les rendements sur une plus grande superficie tout en réduisant le risque de lessivage.

Bien que ces techniques utilisant le fumier ne permettent pas d'ajouter des nutriments au système agro-pastoral en lui-même, elles sont néanmoins un moyen de transfert et de recyclage d'éléments minéraux et de matière organique à différentes échelles à l'intérieur du système. Il est primordial d'optimiser et d'intensifier ces techniques dans un contexte où les agriculteurs locaux ont peu accès aux autres formes de fertilisation.

Malgré le rôle important du fumier pour soutenir la productivité des cultures, deux questions importantes se posent :

- Les quantités de fumier disponibles sont-elles suffisantes pour permettre une production alimentaire adéquate et améliorer la qualité du sol à long terme ?
- Quelle est la capacité des terres de pâtures à supporter le bétail et la récolte de nutriments en vue de fumer les cultures ?

Les agriculteurs possédant beaucoup de bétail ont la capacité potentielle de maintenir la fertilité du sol par l'application de fumier, soit par leurs propres animaux, soit via leurs ressources financières pour engager des bergers transhumants dans des contrats de parage. La plupart des agriculteurs sahéliens sont généralement trop pauvres pour posséder suffisamment de bétail et sont donc moins capables de lutter contre l'épuisement du sol en nutriments. Tant que les pâturages naturels restent la principale source d'alimentation pour le bétail, les éleveurs et agriculteurs riches (en bétail) profiteront le plus de la récolte de nutriments effectuée dans les pâturages et transportée aux cultures par le fumier.

Les résultats de cet essai ont permis de mettre en évidence le fait que **l'application d'engrais** permettait d'augmenter les rendements en grain de 15 à 19 % grâce à l'augmentation du taux de survie à la récolte et du nombre d'épis par poquet. La fertilisation favorise également un développement plus rapide des plants. Contrairement au parage, l'effet du DAP est très peu dépendant de la pluviométrie. Aux doses utilisées dans cet essai, nous recommandons l'application du DAP seul par rapport à l'application de DAP + urée car les rendements ne diffèrent pas significativement entre les deux types de fertilisation. L'application du DAP seul permet d'économiser le coût de l'urée et le travail nécessaire à son application après le démariage.

Nous avons relevé que l'effet du DAP est d'autant plus marqué que le parage et le transport de fumier sont anciens. D'autre part, les effets du parage sur le rendement en grain sont encore importants un et deux ans après application. Les résultats indiquent que les agriculteurs gagneraient à appliquer DAP placé au poquet comme apport-relai en nutriments à partir de la 2^{ème}, voire de la 3^{ème} année après le parage. L'utilisation de fertilisants minéraux en combinaison avec un apport en matière organique a été recommandée par de nombreux auteurs afin de réduire le besoin en superficie de pâturage et d'augmenter la capacité des sols à stocker plus d'éléments nutritifs en diminuant les risques d'acidification.

Les variétés testées ont révélé différents avantages et inconvénients. La variété locale, sélectionnée par les agriculteurs depuis de nombreuses années et adaptée à la région du Fakara, fournit les meilleurs rendements en paille. La variété améliorée ICMV IS 89305 permet une augmentation du rendement en grain de 12 % par rapport au rendement de la variété locale. La variété ICMV peut être recommandée aux agriculteurs qui désirent une augmentation du rendement en grain aux dépens de la production en paille (le rendement en paille baisse de 10 % par rapport à la variété locale). La variété Zatib produit des rendements en grain non significativement différents de ceux de la variété locale mais la production de paille est moindre.

Les variétés améliorées ont amélioré les taux de survie au démariage et à la récolte et ont présenté des contaminations par le mildiou et des infestations par l'adventice shibra légèrement plus faibles que la variété locale. Les semences de variétés améliorées sont toutefois coûteuses et actuellement très peu accessibles pour l'agriculteur sahélien, qui préférera en général semer une partie de sa récolte en grain de l'année précédente.

Les rendements en mil varient fortement d'un site à l'autre et en fonction de la pluviométrie. La pluviométrie annuelle étant très variable même sur de courtes distances, la pratique actuelle qui consiste à disperser les parcelles agricoles dans l'espace semble entièrement justifiée afin de limiter les risques d'échec de la culture.

Le Niger souffre de sous-alimentation chronique, de pauvreté et de surexploitation des ressources en sol ainsi que d'un manque de stimulants pour intensifier l'agriculture. L'accroissement durable de la production agricole peut résulter de l'amélioration de la fertilité des sols par des apports de matière organique et d'engrais. L'application de d'engrais minéraux concerne actuellement moins de 5 kg ha⁻¹an⁻¹ (Buerkert et al., 2001). Les engrais importés sont chers et difficiles d'accès dans les campagnes. Leur utilisation est pourtant essentielle pour remplacer les nutriments prélevés par les cultures et limiter l'épuisement du sol en éléments nutritifs. Dans cette optique, l'amélioration de l'accessibilité des intrants ainsi que la formation, l'organisation et la collaboration entre agriculteurs, chercheurs et responsables politiques nous paraissent essentielles.

Bibliographie

1. Ali, A., Lebel, T., Amani, A. 2003. Invariance in the Spatial Structure of Sahelian Rain Fields at Climatological Scale. *Journal of Hydrometeorology*, 4, 996-1011.
2. Ayantunde, A. A., Fernández-Rivera, S., Hierneaux, P. H. Y., van Keulen, H., Udo, H. M. J. 2001. Effect of timing and duration of grazing of growing cattle in the West African Sahel on diet selection, faecal output, eating time, forage intake and live-weight changes. *Animal Science*, 72, 117-128.
3. Bacchi, O.O.S., Reichardt, K., Calvache, M. 2000. Les sondes à neutrons et à rayons gamma : leurs applications en agronomie. Agence internationale d'énergie atomique, Vienne.
http://www.lthe.hmg.inpg.fr/~laurent/PDFs/Manuel_Sonde_neutrons.pdf
4. Bationo, A., Buerkert, A. 2001. Soil organic carbon management for sustainable land use in Sudano-Sahelian West Africa. *Nutrient Cycling in Agroecosystems*, 61, 131-142.
5. Bationo, A., Lompo, F., Koala, S. 1998. Research on nutrient flows and balance in west Africa : state-of-the-art. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 71, 19-35.
6. Bationo, A., Mokwunye, U., Vlek, P. L. G., Koala, S., Shapiro, B. I. 2003. Soil Fertility Management for Sustainable Land Use in the West African Sudano-Sahelian Zone. In *Soil Fertility Management in Africa : A Regional Perspective* (éd. Gichuru M. P., Bationo A., Bekunda M. A., Goma H. C., Mafongoya P. L., Mugendi D. N., Murwira H. K., Nandwa S. M., Nyathi P., Swift M. J.). Academy Science Publishers, Nairobi, Ch. 8, p. 253-286.
7. Bationo, A., Ntare, B. R. 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. *Journal of Agricultural Science*, 134, p. 277-284.
8. Bationo, A., Vlek, P. L. G. 1997. The role of nitrogen fertilisers applied to food crops in the Sudano-sahelian zone of West Africa. In *Soil Fertility Management in West African Land Use Systems* (éd. Renard G., Neef A., Becker K., von Oppen M.). Margraf Verlag, Weikersheim, Ch. 4, p. 41-51.
9. Bationo, A., Wani, S. P., Biielders, C. L., Vlek, P. L. G., Mokwunye, A. U. 2000. Crop Residue and Fertilizer Management to Improve Soil Organic Carbon Content, Soil Quality and Productivity in the Desert Margins of West Africa. In *Global Climate Change and Tropical Ecosystems* (éd. Lal R., Kimble J. M., Stewart B. A.). CRC Press, London, Ch. 6, p. 117-156.
10. Bidinger, F. R., Raju, D. S. 2000. Mechanisms of adjustment by different pearl millet plant type to varying plant population densities. *Journal of Agricultural Science*, 134, 181-189.

11. Bielders, C. L., Michels, K., Bationo, A. 2002. On-farm evaluation of ridging and residue management options in a sahelian millet-cowpea intercrop. Part 1. Soil quality changes. *Soil Use and Management*, 18, 216-222.
12. Bielders, C. L., Michels, K. 2002. On-farm evaluation of ridging and residue management options in a sahelian millet-cowpea intercrop. Part 2. Crop development. *Soil Use and Management*, 18, 309-315.
13. Brouwer, J., Powell, J. M. 1998. Increasing nutrient use efficiency in West-African agriculture: the impact of micro-topography on nutrient leaching from cattle and sheep manure. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 71, 229-239.
14. Buerkert, A. 1995. Effects of Crops Residues, Phosphorus, and Spatial Soil Variability on Yield and Nutrient Uptake of Pearl Millet (*Pennisetum glaucum* (L.) R. Br.) in Southwest Niger. Thèse. Verlag Ulrich E. Grauer, Stuttgart, pp. 272.
15. Buerkert, A., Bagayoko, M., Bationo, A., Marschner, H. 1997. Site-specific differences in the response of cereals and legumes to rock phosphate, crop residue mulch and nitrogen in the Sudano-Sahelian zone of West-Africa. In *Soil Fertility Management in West African Land Use Systems* (éd. Renard G., Neef A., Becker K., von Oppen M.). Margraf Verlag, Weikersheim, Ch. 5, p. 53-59.
16. Buerkert, A., Bationo, A., Piepho, H.-P. 2001. Efficient phosphorus application strategies for increased crop production in sub-Saharan West Africa. *Field Crops Research*, 72, 1-15.
17. Buerkert, A., Lamers, J. P. A. 1999. Soil erosion effects on surface characteristics and pearl millet growth in the West African Sahel. *Plant and Soil*, 215, 239-253.
18. Buerkert, A., Piepho, H.-P., Bationo, A. 2002. Multi-site time-trend analysis of soil fertility management effects on crop production in sub-Saharan West Africa. *Experimental Agriculture*, 38, 163-183.
19. De Rouw, A. 2004. Improving yields and reducing risks in pearl millet farming in the African Sahel. *Agricultural Systems*, 81, 73-93.
20. De Rouw, A., Rajot, J-L. 2004. Nutrient availability and pearl millet production in Sahelian farming systems based on manuring or fallowing. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 104, 249-262.
21. De Rouw, A., Rajot, J-L. 2004. Soil organic matter, surface crusting and erosion in Sahelian farming systems based on manuring or fallowing. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 104, 263-276.
22. De Rouw, A., Winkel, T. 1998. Drought avoidance by asynchronous flowering in pearl millet stands cultivated on-farm and on-station in Niger. *Experimental Agriculture*, 34, 19-39.
23. Direction de la Météorologie Nationale du Niger. 2003. Climatologie et activités socio-professionnelles au Niger.

<http://www.meteo-niger.net/html/climatccI2.htm>

24. Dufey, G. 2002. Evaluation de techniques agricoles adaptées à la culture associée mil-niébé au Niger. Mémoire présenté en vue de l'obtention du diplôme de bio-ingénieur de l'université catholique de Louvain-la-Neuve (UCL), pp.104.
25. Dufey, J. Pédologie (MILA 2110). Faculté d'ingénierie biologique, agronomique et environnementale, Université Catholique de Louvain.
26. Esse, P.C., Buerkert, A., Hiernaux, P., Assa, A. 2001. Decomposition of and nutrient release from ruminant manure on acid sandy soils in the Sahelian zone of Niger, West Africa. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 83, 55–63.
27. FAO. 2001. Profil fourrager du Niger par Geesing, D. et Hassane, D.
<http://www.fao.org/ag/AGP/AGPC/doc/counprof>
28. FAO. 2005. AQUASTAT Information System on Water and Agriculture. Country Profiles – Niger.
<http://www.fao.org/waicent/faoinfo/agricult/agl/aglw/aquastat/countries/index.stm>
29. FAOSTAT, World Bank. 2005. Food and agriculture indicators - World Development Indicators.
<http://faostat.fao.org>
30. Gandah, M., Bouma, J., Brouwer, J., Hiernaux, P., Van Duivenbooden, N. 2003. Strategies to optimize allocation of limited nutrients to sandy soils of the Sahel : a case study from Niger, West Africa. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 94, 311–319.
31. Gérard, G. 1998. Biométrie : Biométrie et analyse des données (AGRO 2110). Faculté d'ingénierie biologique, agronomique et environnementale, Université Catholique de Louvain.
32. Hafner, H., Bley, J., Bationo, A., Martin, P, Marschner, H. 1993. Long-term nitrogen balance for pearl millet (*Pennisetum glaucum*) in an acid sandy soil of Niger. *Journal of Plant Nutrition*, 156, 169-176.
33. Harris, F. 2002. Management of manure in farming systems in semi-arid West Africa. *Experimental Agriculture*, 38, 131-148.
34. Hayashi, K., Matsunaga, R., Abdoulaye, T. 2005. Suitable approach for sustainable soil fertility management in Sahelian zone of Niger, West Africa (communiqué par l'auteur)
35. Hiernaux, P., Ayantunde, A. 2004. The Fakara : a semi-arid agro-ecosystem under stress. Report of research activities. First phase (July 2002-June 2004) of the DMP-GEF Program (GEF/2711-02-4516). ILRI (International Livestock Research Institute), Niamey, Niger, pp .95.

36. Hiernaux, P., Fernández-Rivera, Schlecht, E., Turner, M. D., Williams, T. O. 1997. Livestock-mediated nutrient transfers in Sahelian agro-ecosystems. In *Soil Fertility Management in West African Land Use Systems* (éd. Renard G., Neef A., Becker K., von Oppen M.). Margraf Verlag, Weikersheim, Ch. 45, p. 339-347.
37. Hiernaux, P., Gérard, B. 1999. The influence of vegetation pattern on the productivity, diversity and stability of vegetation : The case of 'Brousse tigrée' in the Sahel. *Acta Oecologica*, 20 (3), 147-158.
38. ICRISAT. 2003. Evaluation of hill placed application of mineral fertilizer in South-Western Niger under a range farmer practices and manuring. Archival report season 2003.
39. ICRISAT. 2004. Evaluation of hill placed application of mineral fertilizer in South-Western Niger under a range farmer practices and manuring. Archival report season 2004.
40. ICRISAT. 2005. Strategic Fertiliser Placement, on-farm experiment, Fakara 2005 (STFP05FA). Description of experiment, Season 2005.
41. IFA, FAO. 2001. Guide du détaillant d'engrais. Version révisée publiée par l'Association internationale de l'industrie des engrais (IFA) et l'Organisation des Nations Unies pour l'alimentation et l'agriculture (FAO). Paris.
<http://www.fao.org/waicent/faoinfo/agricult/ags/AGSM/guidefr.pdf>
42. Ikpe, F. N., Powell, J. M., Isirimah, N. O., Wahua, T. A. T., Ngodigha, E. M. 1999. Effects of primary tillage and soil amendment practices on pearl millet yield and nutrient uptake in the Sahel of West Africa. *Experimental Agriculture*, 35, 437-448.
43. Klaij, M. C., Vachaud, G. 1992. Seasonal water balance of a sandy soil in Niger cropped with pearl millet, based on profile moisture measurements. *Agricultural Water Management*, 21, 313-330.
44. Kretschmar, R. M., Hafner, H., Bationo, A., Marschner, H. 1991. Long- and short-term effects of crop residues on aluminium toxicity, phosphorus availability and growth of pearl millet in an acid sandy soil. *Plant and Soil*, 136, 215-223.
45. Lamers, J., Bruentrup, M., Buerkert, A. 1998. The profitability of traditional and innovative mulching techniques using millet crop residues in the West African Sahel. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 67, 23-35.
46. Mahamane, I., Bationo, A., Seyni, F., Hamidou, Z. 1997. Acquis récents des recherches sur les phosphates naturels du Niger. In *Soil Fertility Management in West African Land Use Systems* (éd. Renard G., Neef A., Becker K., von Oppen M.). Margraf Verlag, Weikersheim, Ch. 8, p. 73-78.
47. Maiti, R. K., Bidinger F. R. 1981. Growth and development of the pearl millet plant. ICRISAT research bulletin No 6.

48. Manyame, C., Gérard, B., Fatondji, D., Payne, W. A. 2005. On farm yield and water use response of Pearl Millet to different management practices in Niger. Poster.
49. Mbaye, D. F. 1993. Contraintes phytosanitaires du mil dans le Sahel: Etat des connaissances et perspectives.
http://www.bondy.ird.fr/pleins_textes/pleins_textes_6/colloques2/38960.pdf
50. Michels, K., Biolders, C. L. 2006. Pearl millet growth on an erosion-affected soil in the Sahel. *Experimental Agriculture*, 42, 1-17.
51. Muehlig-Versen, B., Buerkert, A., Bationo, A., Marschner, H. 1997. Crop residue and phosphorus management in millet based cropping systems on sandy soils of the Sahel. In *Soil Fertility Management in West African Land Use Systems* (éd. Renard G., Neef A., Becker K., von Oppen M.). Margraf Verlag, Weikersheim, Ch. 3, p. 31-42.
52. Muehlig-Versen, B., Buerkert, A., Bationo, A., Roemheld, V. 2003. Phosphorus placement on acid arenosols of the West African Sahel. *Experimental Agriculture*, 39, 307-325.
53. Neef, A. 1997. Le contrat de parcage, fumure pour les riches? Une étude de cas au sud-ouest du Niger. In *Soil Fertility Management in West African Land Use Systems* (éd. Renard G., Neef A., Becker K., von Oppen M.). Margraf Verlag, Weikersheim, Ch. 49, p. 381-386.
54. Niangado, O. 1989. Production amélioration variétale du mil au Mali. In *Plantes vivrières tropicales* (éd. Aupelf-Uref). John Libbey Eurotext, Paris, Ch. 8, p. 69-82.
55. PNUD. 2005. Rapport mondial sur le développement humain 2005.
<http://hdr.undp.org/reports/global/2005/francais/>
56. Powell, J. M., Fernández-Rivera, S., Hiernaux, P., Turner, M. D. 1996. Nutrient cycling in Integrated Rangeland/Cropland Systems of the Sahel. *Agricultural Systems*, 32 (2/3), 143-170.
57. Powell, J. M., Ikpe, F. N., Somda, Z. C., Fernández-Rivera, S. 1998. Urine effects on soil chemical properties and the impact of urine and dung on pearl millet yield. *Experimental Agriculture*, 34, 259-276.
58. Powell, J., Valentin, C. 1997. Effects of livestock on soil fertility in West Africa. In *Soil Fertility Management in West African Land Use Systems* (éd. Renard G., Neef A., Becker K., von Oppen M.). Margraf Verlag, Weikersheim, Ch. 44, p. 319-334.
59. Schlecht, E., Buerkert, A. 2004. Organic inputs and farmer's management strategies in millet fields of western Niger. *Geoderma*, 121, 271-289.
60. Schlecht, E., Fernández-Rivera, S., Hiernaux, P. 1997. Timing, size and nitrogen concentration of faecal and urinary excretions in cattle, sheep and goats: Can they be exploited for better manuring of cropland? In *Soil Fertility Management in West African Land Use Systems* (éd. Renard G., Neef A., Becker K., von Oppen M.). Margraf Verlag, Weikersheim, Ch. 47, p. 361-367.

61. Shapiro, B. I., Sanders, J. H. 1998. Fertilizer Use in Semiarid West Africa: Profitability and Supporting Policy. *Agricultural Systems*, 56 (4), 467-482.
62. Sivakumar, M. V. K., Maidoukia, A., Stern, R. D. 1993. Agroclimatologie de l'Afrique de l'Ouest: le Niger. Bulletin d'information n°5. ICRISAT, Patancheru, Inde/Direction de la météorologie nationale du Niger, Niamey, Niger, pp.116.
63. Sivakumar, M. V. K., Salaam, S. A. 1999. Effect of year and fertilizer on water-use efficiency of pearl millet (*Pennisetum glaucum*) in Niger. *Journal of Agricultural Science*, 132, 139-148.
64. Subbarao, G. V., Renard, C., Payne, W. A., Bationo A. 2000. Long-term effects of tillage, phosphorus fertilization and crop rotation on pearl millet-cowpea productivity in the west-African Sahel. *Experimental Agriculture*, 36, 243-264.
65. Traoré, S., Bagayogo, M., Coulibaly, B. S., Coulibaly, A. 2002. Amélioration de la gestion de la fertilité des sols et celle des cultures dans les zones sahéliennes de l'Afrique de l'Ouest: une condition sine qua none pour l'augmentation de la productivité et de la durabilité des systèmes de culture à base de mil. Syngenta foundation for sustainable agriculture <http://www.syngentafoundation.org>
66. Van Duivenbooden, N. 1996. La durabilité exprimée en termes d'éléments nutritifs – avec référence spéciale à l'Afrique de l'Ouest. In Rapports du projet Production Soudano-Sahélienne (PSS) N° 29 (Partie A), Wageningen, Ch. 1 - 4. http://library.wur.nl/way/catalogue/documents/Sahel/RAP29/RAP29A.HTM#Heading_1
67. Van Wambeke A., 1995. Sols des Tropiques, Propriétés et appréciation. CTA (Centre technique coopération agricole et rurale), Wageningen, pp. 335.
68. Winkel, T., Do, F. 1992. Caractères morphologiques et physiologiques de résistance du mil (*Pennisetum glaucum* (L.) R. Br.) à la sécheresse. *L'agronomie tropicale*, 46 (4), 339-350.
69. Winkel, T., Renno, J-F., Payne W.A. 1997. Effect of the timing of water deficit on growth, phenology and yield of pearl millet (*Pennisetum glaucum* (L.) R. Br.) grown in Sahelian conditions. *Journal of Experimental Botany*, 48 (310), 1001-1009.
70. Yamoah, C. F., Bationo, A., Shapiro, B., Koala, S. 2002. Trend and stability analyses of millet yields treated with fertilizer and crop residues in the Sahel. *Fields Crops Research*, 75, 53-62.

Annexes

Annexe 1 - Fiches techniques des variétés améliorées.....	p. 1-2
Annexe 2 - Schéma du dispositif expérimental.....	p. 2-3
Annexe 3 - Méthodes d'analyse chimique et physique des sols.....	p. 1-2
Annexe 4 - Distributions des variables d'analyse.....	p. 4-5
Annexe 5 - Pluviométrie.....	p. 5-9
Annexe 6 - Tableaux de corrélations entre variables.....	p. 6-12
Annexe 7 - Tableaux de moyennes, analyse de variance et comparaisons multiples par année	p. 7-18
Annexe 8 - Tableaux de moyennes, analyse de variance et comparaisons multiples sur 3 ans	p. 8-31
Annexe 9 - Comparaison visuelle de parcelles en 2003.....	p. 9-40
Annexe 10 - Evolution de la phénologie du mil en 2005.....	p. 10-42
Annexe 11 - Caractéristiques phytosanitaires moyennes des parcelles en 2003, 2004 et 2005	p. 11-44

1. Fiches techniques des variétés améliorées

Année d'obtention

Origine : Obtenue par sélection récurrente à partir du croisement entre les cultivars locaux Zanfarwa et Tchin-Bijini

Caractéristiques de la plante

Floraison (jour):	60
Maturité (jour):	95
Taille de la plante(cm):	190-200
Talles plante ⁻¹ :	4
Forme de l'épi:	Cylindrique
Longueur de l'épi (cm):	65
Circonférence (cm):	9
Exsertion (cm):	-5
Compacité:	Compacte

Caractéristiques de la graine

Couleur:	Gris-jaunâtre
Forme:	Obovale
Poids de graines (g 1000 ⁻¹) :	10.5

Sensibilité aux ravageurs et maladies

Foreur de tige:	Sensible
Chenille de l'épi :	Tolérante
Mildiou:	Résistante

Rendement potentiel

Grain (t ha ⁻¹):	1.5 - 2.0
Matière sèche (t ha ⁻¹):	6.0
Indice de récolte (%):	27

Année d'obtention : 1989

Origine : Obtenue par sélection récurrente à partir des croisements entre les variétés 3/4 HK B-78, Souna-3 et CIVT

Caractéristiques de la plante

Floraison (jour):	70
Maturité (jour):	95-100
Taille de la plante (cm) :	250
Talles plante ⁻¹ :	4
Forme de l'épi:	Cylindrique
Longueur de l'épi (cm):	55
Circonférence (cm):	9
Exsertion (cm):	-2
Compacité:	Compacte

Caractéristiques de la graine

Couleur:	Brun-jaunâtre
Forme:	Obovale

Poids de graine (g 1000⁻¹): 10

Sensibilité aux ravageurs et**maladies**

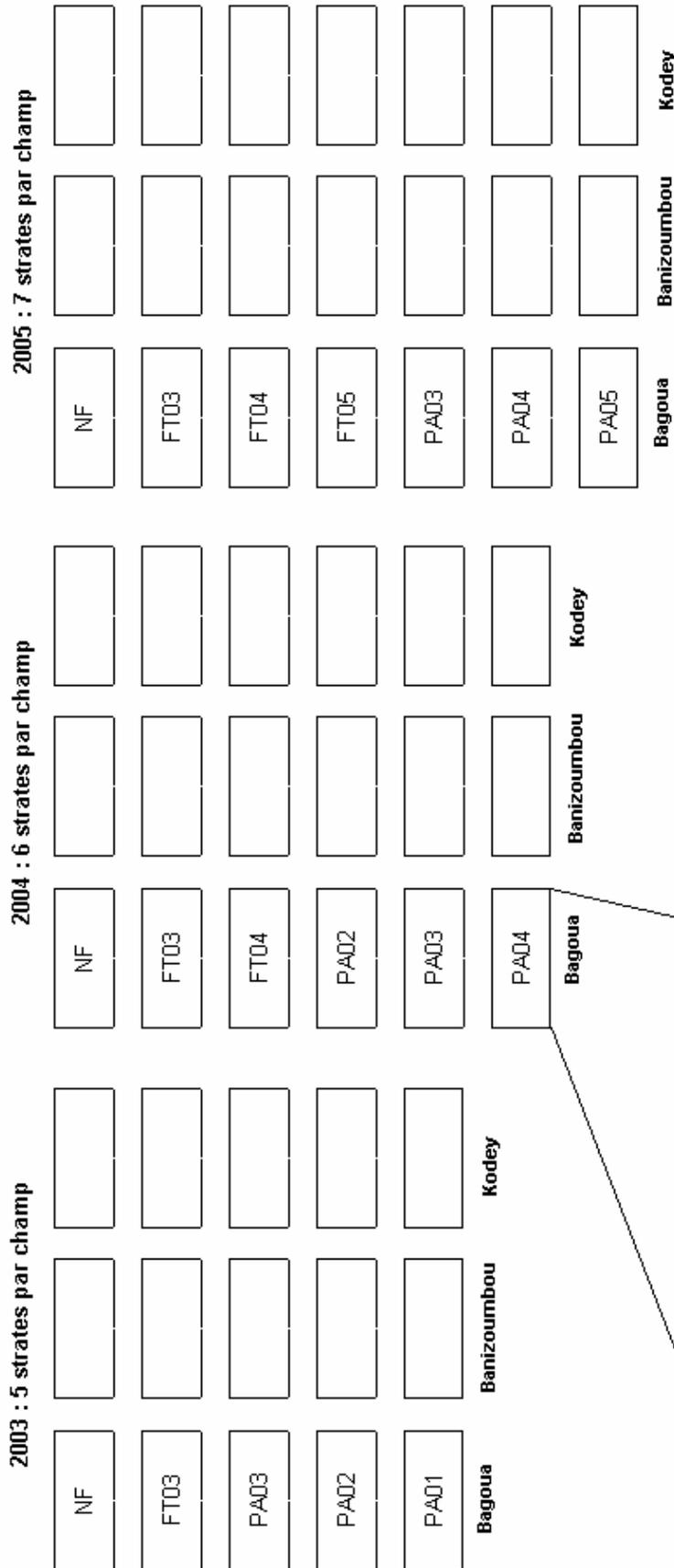
Foreur de tige:	Tolérante
Chenille de l'épi:	Sensible
Mildiou:	Résistante

Rendement potentiel

Grain (t ha ⁻¹):	2.0
Matière sèche (t ha ⁻¹):	6.5
Indice de récolte (%):	27



2. Schéma du dispositif expérimental



Numérotation des parcelles en fonction de la variété de mil et de l'engrais minéral utilisé

Parcelles	Fertilisant	Variété
101	DAP	Locale
102	DAP+Urée	ICMV
103	Témoins	Locale
104	DAP+Urée	Locale
105	DAP+Urée	Zatib
106	DAP	ICMV
107	Témoins	Zatib
108	Témoins	ICMV
109	DAP	Zatib

Division d'une strate en parcelles

101	102	103	104	105	106	107	108	109
209	208	207	206	205	204	203	202	201
301	302	303	304	305	306	307	308	309

9 combinaisons variété X engrais minéral

3 répétitions

parcelle élémentaire

3. Méthodes d'analyse chimique et physique des sols

Laboratoire de Chime des Sols de l'ICRISAT, Centre Sahélien, Sadoré (Niger)

ANALYSE/METHODE	EXTRACTION	DETERMINATION QUANTITATIVE
pH-H ₂ O (1:2.5)	Eau distillée	Potentiométrie: Lecture directe au pH-mètre
Conductivité Eelectrique (CE _{2.5})	Eau distillée (Rapport, 1:2.5)	Lecture directe au Conductimètre
pH-KCl (1:2.5)	KCl 1M	Potentiométrie: Lecture directe au pH-mètre
Acidité d'Echange (H ⁺ & Al ³⁺)	KCl 1M	Titration avec NaOH pour H ⁺ +Al ³⁺ et Titration avec HCl pour Al ³⁺
Bases Echangeables (Na ⁺ , K ⁺ Ca ²⁺ , Mg ²⁺)	AgTU 0.01M	Spectroscopie d'Absorption Atomique pour Ca-Mg et Spectroscopie d'Emission de flamme pour Na et K
Capacité d'Echg. Cationique) (méthode Argent Thiourée)	AgTU 0.01M	Lecture Ag par Spectro d'Abs. Atomique
Phosphore Assimilable (méthode Bray 1)	HCl 0.025N & NH ₄ F 0.03N	Colorimétrie: Methode du complexe Molybdo-Phosphate réduit à l'acide ascorbique
Phosphore Total (Sols & Plantes)	Digestion H ₂ SO ₄ + Acide Salicylique+ H ₂ O ₂ et Selenium	Colorimétrie: Methode du complexe Molybdo-Phosphate réduit à l'acide ascorbique
Azote Total (Sols & Plantes)	Même extrait que le Phosphore total	Par colorimétrie à l'Auto-Analyseur en utilisant la réaction de Bertholet
K, Ca et Mg Totaux (Plantes)	Même extrait que le Phosphore total	Spectroscopie d'Absorption Atomique pour Ca-Mg et Spectroscopie d'Emission de flamme pour K
Carbone Organique (Méthode Walkley & Black)	Oxydation de la Mat. Org. avec un mélange de H ₂ SO ₄ et K ₂ Cr ₂ O ₇	Titration de la quantité restante de K ₂ Cr ₂ O ₇ avec du Sulfate Ferreux
Granulométrie (Tamisage & Pipettage)	Oxydation de la Mat. Org. avec H ₂ O ₂ Dispersion avec une solution de (NaPO ₃) ₆	Tamisage pour les particules >50µm Pipettage pour les particules <50µm

NB: Le manuel de référence pour ces méthodes d'analyse (exception faite pour N, P, K, Ca et Mg totaux) est le suivant: **Technical Paper No. 9, PROCEDURES FOR SOIL ANALYSES**

FOURTH EDITION, Edited by L. P. van Reeuwijk, 1993

INTERNATIONAL SOIL REFERENCE AND INFORMATION CENTRE (ISRIC)

Pour N, P, K, Ca et Mg totaux, se référer à:

Soil Analysis Procedures, Other Procedures (Soil and Plant Analysis, Part 5B), Syllabus'1995

Edited by V. J. G. Houba, J. J. van der Lee and I. Novozamsky

Departement of Soil Science and Plant Nutrition / Wageningen Agricultural University

4. Distributions des variables d'analyse (données de 2003 à 2005)

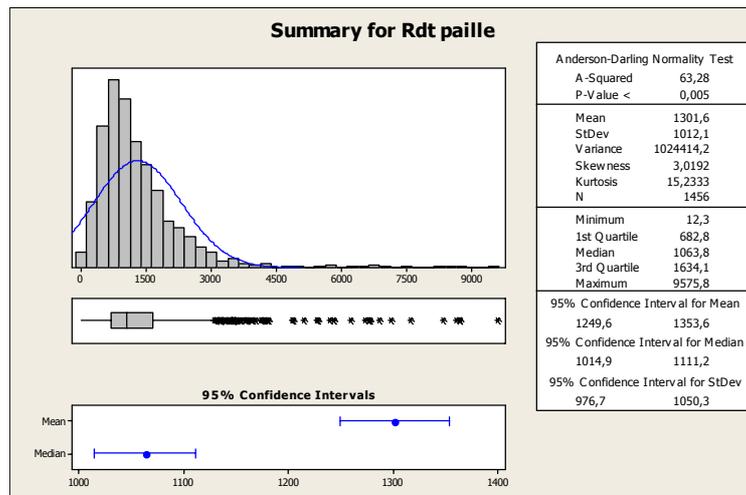
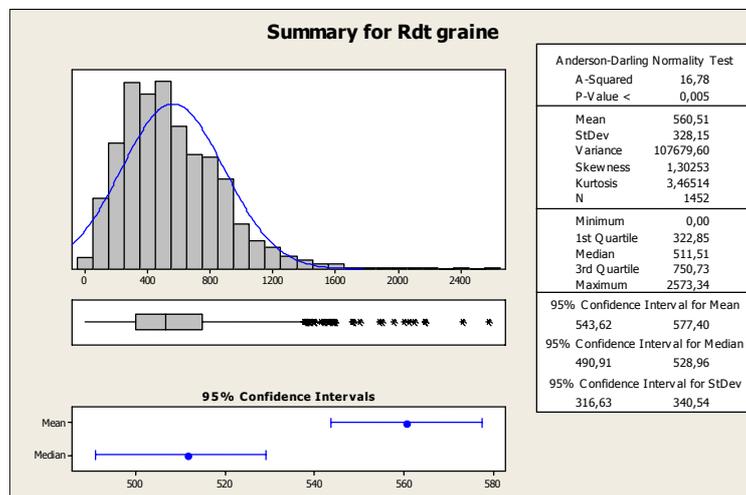
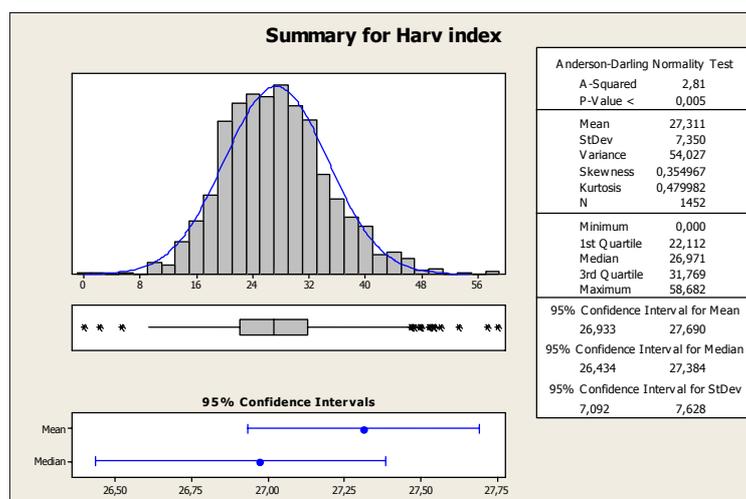
Figure 4-1. Distribution de la variable « rendement en paille (kg ha⁻¹) »Figure 4-2. Distribution de la variable « rendement en grain (kg ha⁻¹) »

Figure 4-3. Distribution de la variable « indice de récolte (%) »

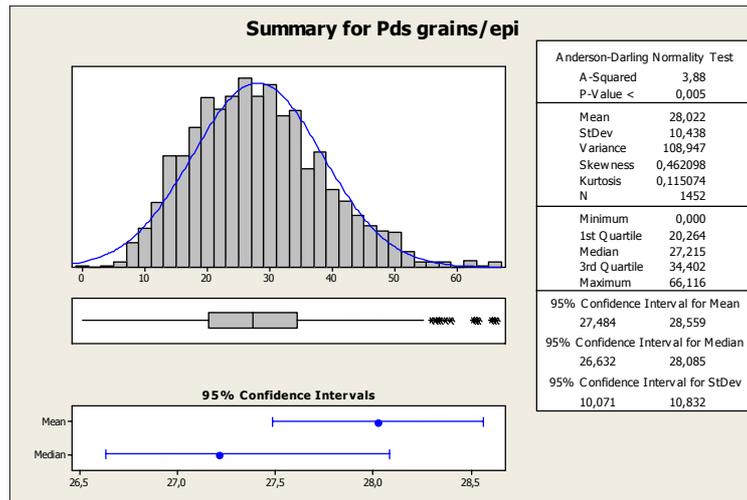


Figure 4-4. Distribution de la variable « poids des grains par épi (g) »

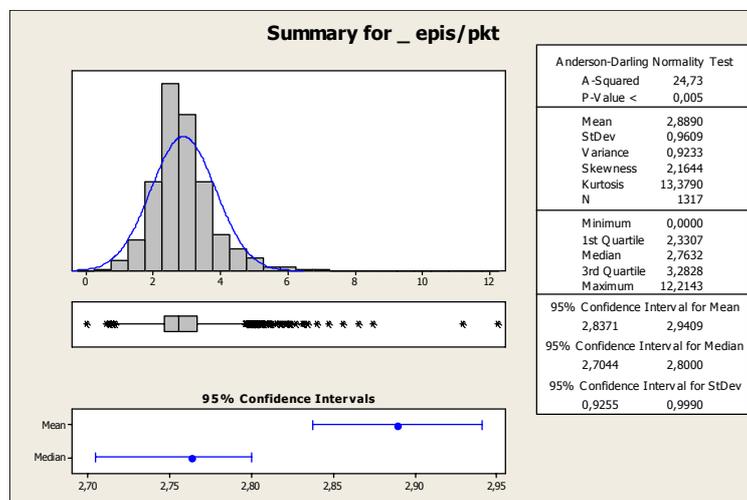


Figure 4-5. Distribution de la variable « nombre d'épis par poquet »

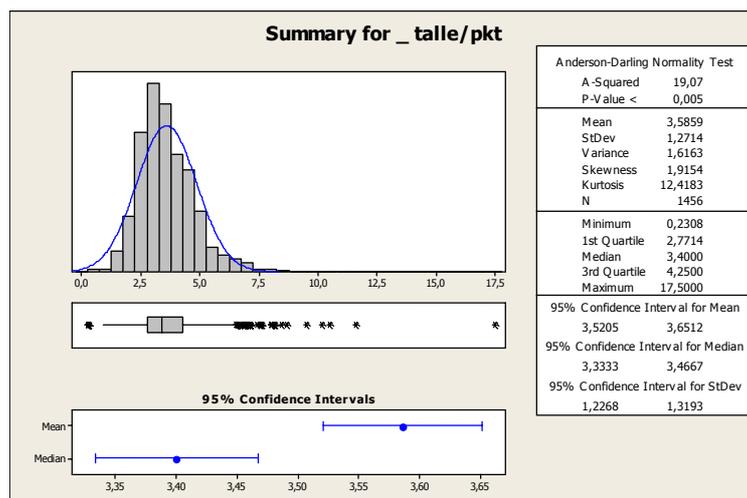


Figure 4-6. Distribution de la variable « nombre de talles par poquet »

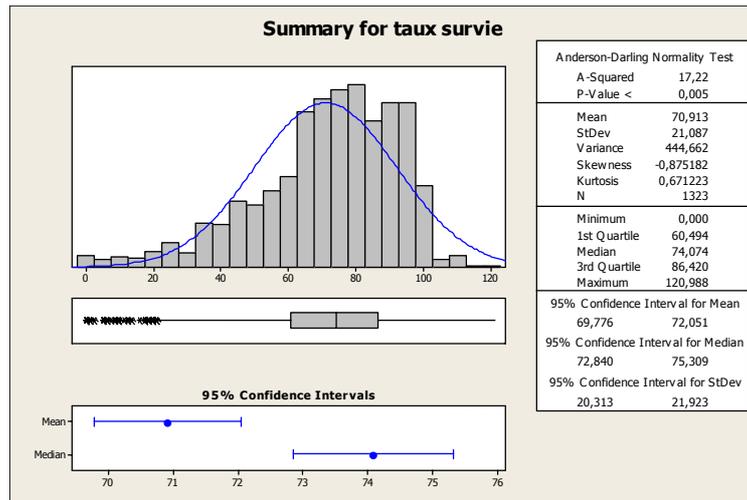


Figure 4-7. Distribution de la variable « taux de survie à la récolte (%) »

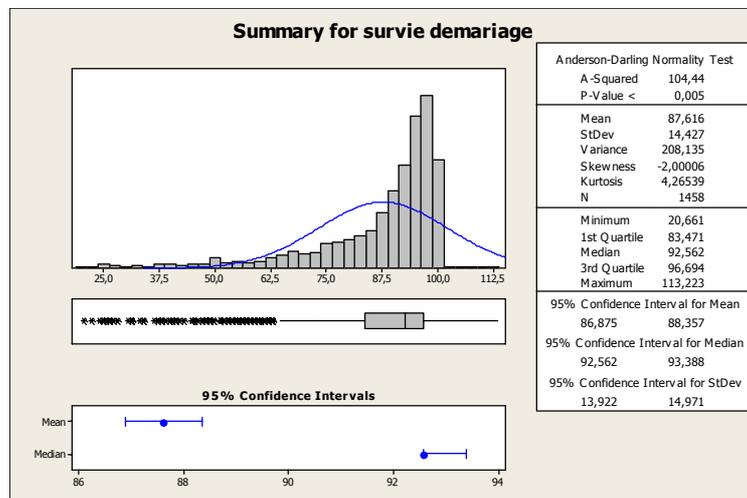


Figure 4-8. Distribution de la variable « taux de survie au démariage (%) »

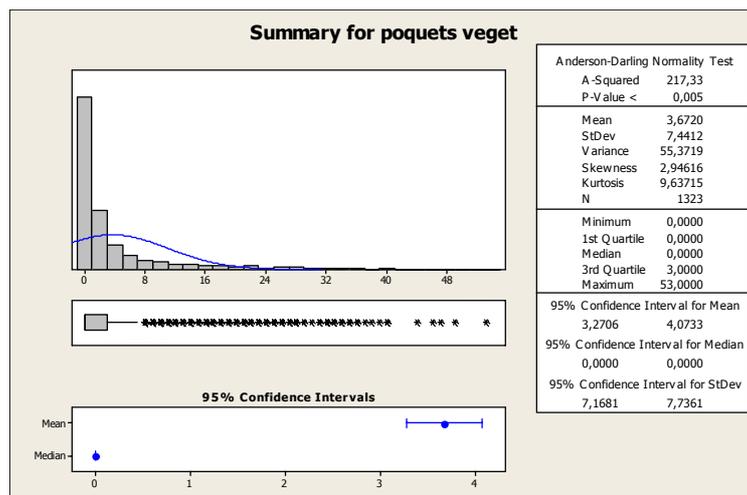


Figure 4-9. Distribution de la variable « nombre de poquets végétatifs par parcelle »

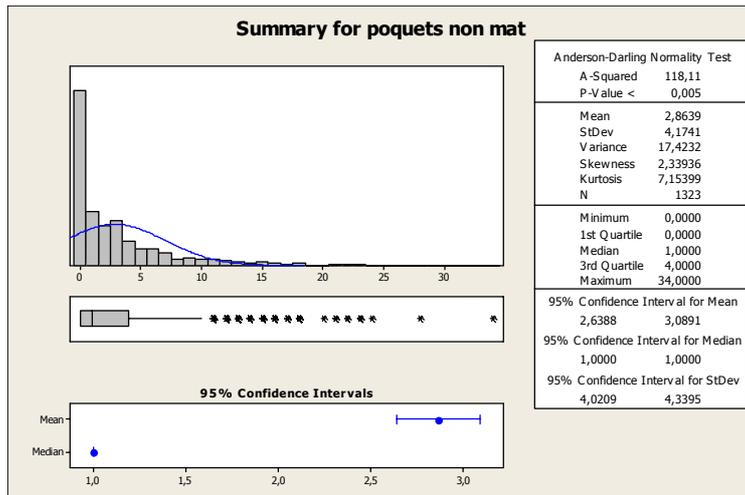


Figure 4-10. Distribution de la variable « nombre de poquets non matures par parcelle »

5. Pluviométrie

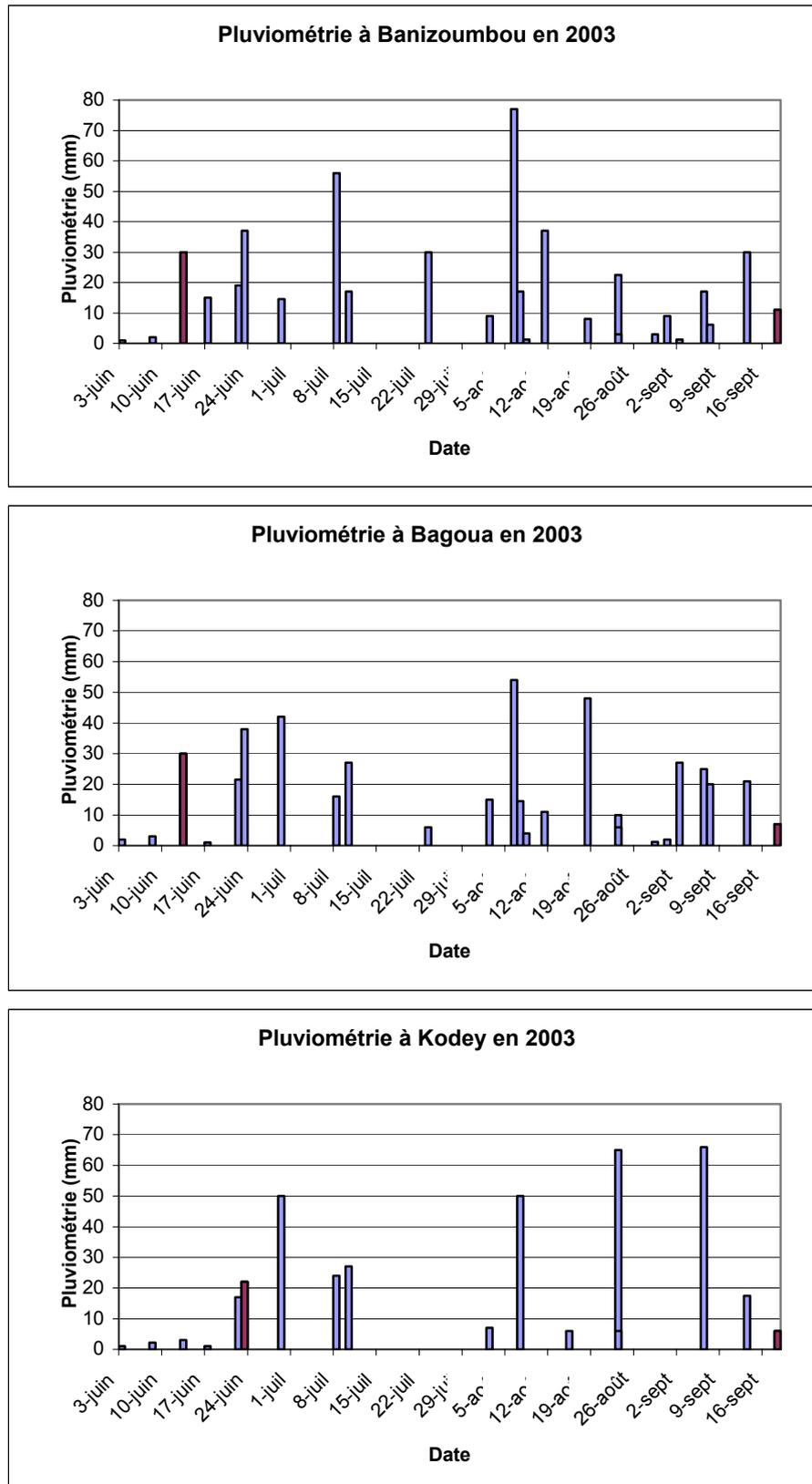


Figure 5-1. Pluviométrie en 2003 à Banizoumbou, Bagoua et Kodey
 Les pluies en noir indiquent le semis et la dernière pluie enregistrée avant la récolte.

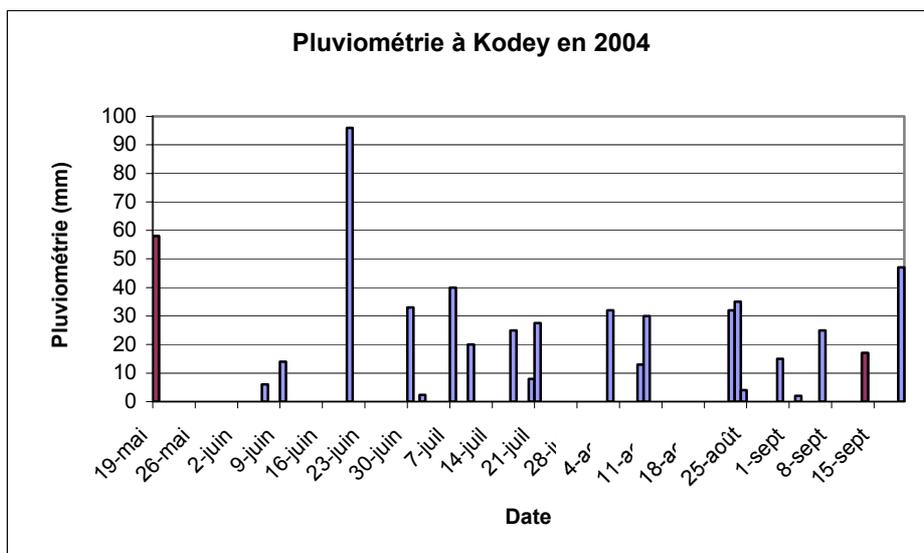
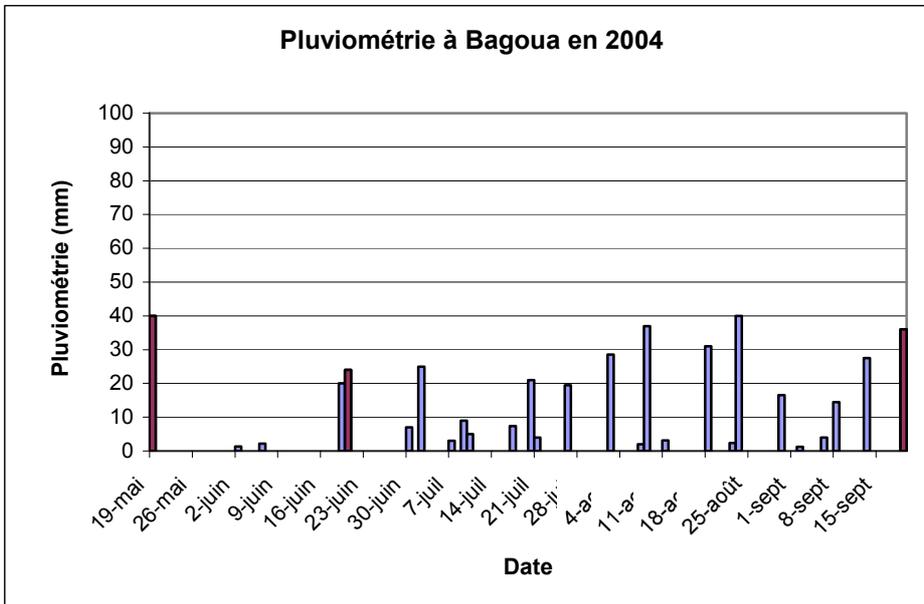
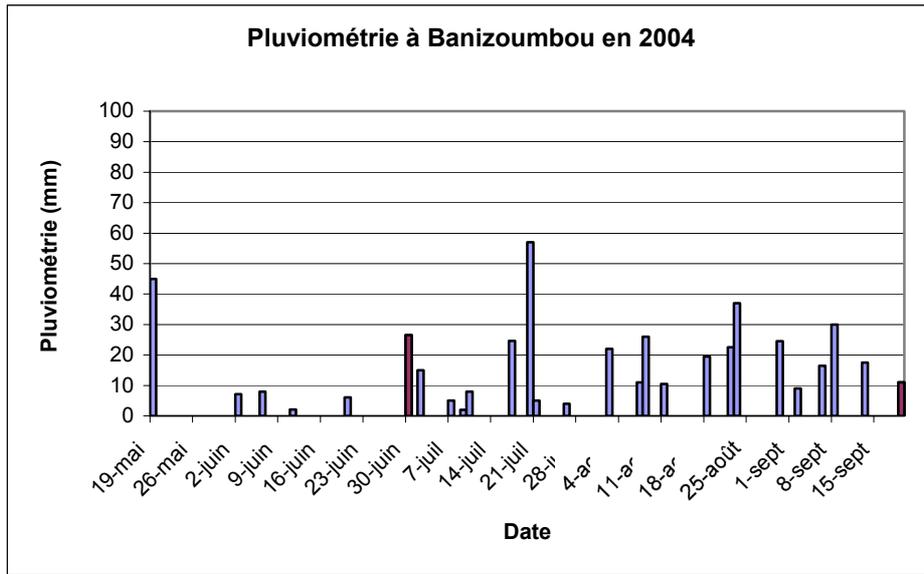


Figure 5-2. Pluviométrie en 2004 à Banizoumbou, Bagoua et Kodey
 Les pluies en noir indiquent le semis, le resemis et la dernière pluie enregistrée avant la récolte.

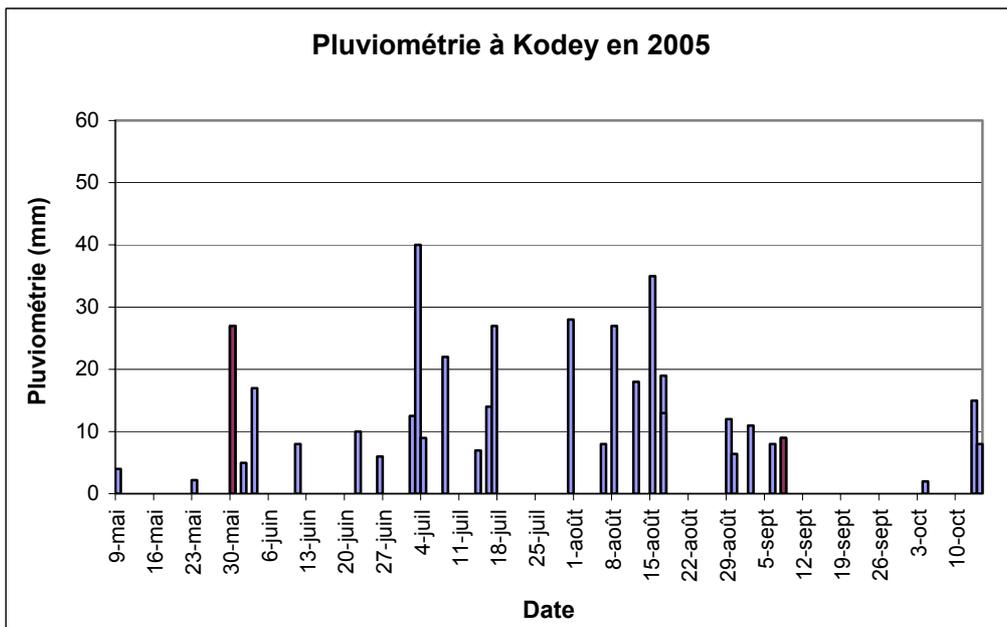
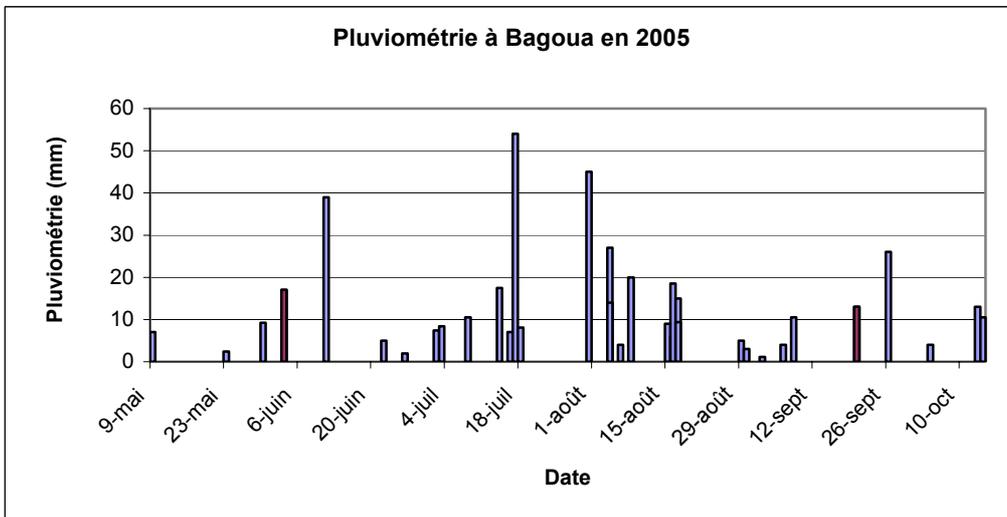
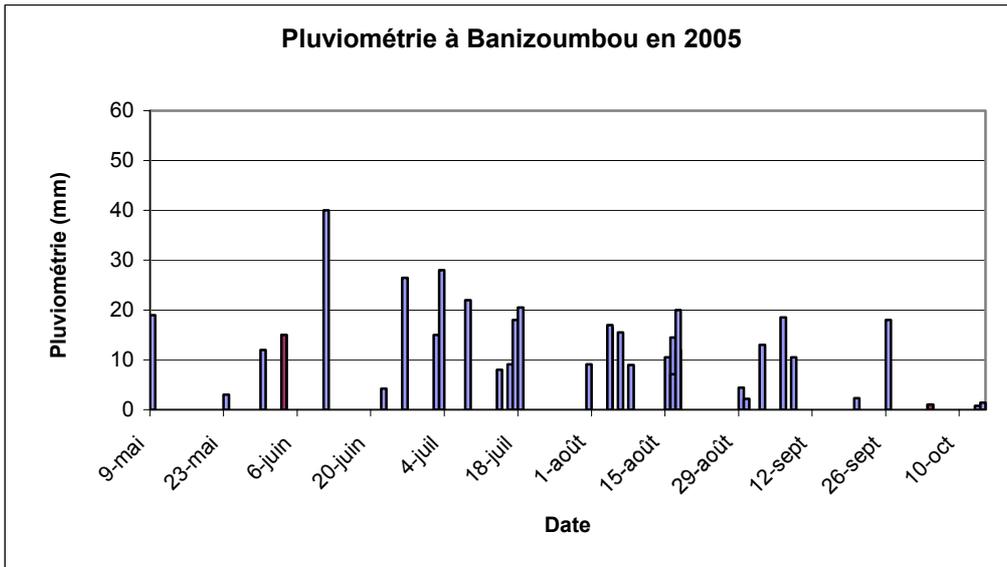


Figure 5-3. Pluviométrie en 2005 à Banizoumbou, Bagoua et Kodey
 Les pluies en noir indiquent le semis et la dernière pluie enregistrée avant la récolte.

6. Tableaux de corrélations entre variables

Tableau 6-1. Coefficients corrélation de Spearman et p-valeurs à Banizoumbou en 2003

Banizoumbou 2003	Rendement en paille	Rendement en grain	Indice de récolte	Poids des grains épi ¹	Nombre d'épis poquet ¹	Nombre talles poquet ¹	Survie à la récolte	Survie au démariage	Nombre de poquets végétatifs
Rendement en grain	0,931								
Indice de récolte	-0,474	-0,19							
Poids des grains épi ¹	0,577	0,691	-0,01						
Nombre d'épis poquet ¹	0,869	0,873	-0,267	0,365					
Nombre talles poquet ¹	0,836	0,79	-0,432	0,574	0,749				
Survie à la récolte	0,336	0,362	-0,072	0,064	0,251	0,141			
Survie au démariage	0,194	0,257	0,176	-0,123	0,247	-0,004	0,645		
Nombre de poquets végétatifs	-0,265	-0,31	0,102	-0,261	-0,329	-0,254	-0,412	-0,103	
Nombre de poquets non matures	-0,293	-0,351	0,032	-0,328	-0,328	-0,304	-0,361	-0,117	0,64
	0,001	0	0,71	0	0	0	0	0,177	0

Tableau 6-2. Coefficients corrélation de Spearman et p-valeurs à Bagoua en 2003

Bagoua 2003	Rendement en paille	Rendement en grain	Indice de récolte	Poids des grains épi ¹	Nombre d'épis poquet ¹	Nombre talles poquet ¹	Survie à la récolte	Survie au démariage	Nombre de poquets végétatifs
Rendement grain	0,839								
Indice de récolte	-0,588	-0,114							
Poids des grains épi ¹	0,422	0,517	-0,025						
Nombre d'épis poquet ¹	0,577	0,557	-0,274	0,235					
Nombre talles poquet ¹	0,378	0,303	-0,261	0,44	0,583				
Survie à la récolte	0,01	0,147	0,187	-0,278	-0,565	-0,462			
Survie au démariage	-0,074	0,019	0,138	-0,333	-0,572	-0,574	0,849		
Nombre de poquets végétatifs	-0,246	-0,267	0,103	-0,201	-0,259	-0,204	0,089	0,117	
Nombre de poquets non matures	-0,293	-0,338	0,101	-0,22	-0,309	-0,212	0,056	0,115	0,771
	0,001	0	0,245	0,01	0	0,014	0,516	0,186	0

Tableau 6-3. Coefficients corrélation de Spearman et p-valeurs à Kodey en 2003

Kodey 2003	Rendement en paille	Rendement en grain	Indice de récolte	Poids des grains épi ¹	Nombre talles poquet ¹
Rendement en grain	0,767				
Indice de récolte	-0,159	0,419			
Poids des grains épi ¹	0,456	0,586	0,321		
Nombre talles poquet ¹	0,52	0,543	0,105	0,267	
Survie au démariage	0,011	0,03	0,026	-0,206	-0,226
	0,897	0,73	0,766	0,017	0,009

Tableau 6-4. Coefficients corrélation de Spearman et p-valeurs tous sites confondus en 2003

Tous sites 2003	<i>Rendement en paille</i>	<i>Rendement en grain</i>	<i>Indice de récolte</i>	<i>Poids des grains épi⁻¹</i>	<i>Nombre talles poquet¹</i>
Rendement en grain	0,913 0				
Indice de récolte	-0,394 0	-0,087 0,08			
Poids des grains épi ⁻¹	0,497 0	0,609 0	0,052 0,3		
Nombre talles poquet ¹	0,64 0	0,611 0	-0,213 0	0,493 0	
Survie au démariage	0,092 0,064	0,113 0,023	0,039 0,437	-0,307 0	-0,307 0

Tableau 6-5. Coefficients corrélation de Spearman et p-valeurs à Banizoumbou en 2004

Banizoumbou 2004	<i>Rendement en paille</i>	<i>Rendement en grain</i>	<i>Indice de récolte</i>	<i>Poids des grains épi⁻¹</i>	<i>Nombre d'épis poquet¹</i>	<i>Nombre talles poquet¹</i>	<i>Survie à la récolte</i>	<i>Survie au démariage</i>	<i>Nombre de poquets végétatifs</i>	<i>Nombre de poquets non matures</i>	<i>MOV</i>
Rendement grain	0,881 0										
Indice de récolte	0,244 0,002	0,57 0									
Poids des grains épi ⁻¹	0,33 0	0,422 0	0,474 0								
Nombre d'épis poquet ¹	0,58 0	0,604 0	0,222 0,005	-0,006 0,945							
Nombre talles poquet ¹	0,474 0	0,433 0	0,078 0,333	0,139 0,085	0,282 0						
Survie à la récolte	0,769 0	0,816 0	0,541 0	0,208 0,009	0,321 0	0,287 0					
Survie au démariage	0,328 0	0,342 0	0,241 0,002	-0,083 0,305	0,151 0,06	0,104 0,191	0,506 0				
Nombre de poquets végétatifs	-0,631 0	-0,691 0	-0,494 0	-0,238 0,003	-0,315 0	-0,272 0	-0,717 0	-0,098 0,217			
Nombre de poquets non matures	-0,417 0	-0,492 0	-0,109 0,177	-0,016 0,841	-0,14 0,081	-0,149 0,059	-0,387 0	0,069 0,383	0,423 0		
MOV	0,201 0,011	0,183 0,022	0,088 0,272	0,105 0,191	-0,03 0,712	0,05 0,531	0,295 0	0,175 0,026	-0,131 0,097	-0,127 0,107	
MOF	0,474 0	0,518 0	0,218 0,006	0,225 0,005	0,212 0,008	0,13 0,102	0,46 0	0,275 0	-0,331 0	-0,35 0	0,201 0,01

Tableau 6-6. Coefficients corrélation de Spearman et p-valeurs à Bagoua en 2004

Bagoua 2004	Rendement en paille	Rendement en grain	Indice de récolte	Poids des grains épi ⁻¹	Nombre d'épis poquet ⁻¹	Nombre talles poquet ⁻¹	Survie à la récolte	Survie au dé mariage	Nombre de poquets végétatifs	Nombre de poquets non matures	MOV	MOF
Rendement grain	0,666											
Indice de récolte	-0,402	0,354										
Poids des grains épi ⁻¹	0,446	0,579	0,175									
Nombre d'épis poquet ⁻¹	0,378	0,385	-0,015	0,194								
Nombre talles poquet ⁻¹	0,575	0,286	-0,37	0,395	0,425							
Survie à la récolte	0,121	0,465	0,394	-0,105	-0,359	-0,301						
Survie au dé mariage	-0,192	0,046	0,265	-0,347	-0,312	-0,515	0,446					
Nombre de poquets végétatifs	-0,494	-0,572	-0,11	-0,358	-0,249	-0,266	-0,438	0,309				
Nombre de poquets non matures	-0,282	-0,322	-0,063	-0,239	-0,184	-0,239	-0,15	0,265	0,308			
MOV	0,04	0,006	-0,032	-0,112	-0,208	-0,095	0,155	-0,004	0,023	0,039		
MOF	0,613	0,936	0,682	0,155	0,008	0,228	0,049	0,959	0,773	0,627		
	0,338	0,113	-0,262	0,206	0,088	0,376	-0,107	-0,56	-0,273	-0,199	0,686	
	0	0,153	0,001	0,009	0,268	0	0,176	0	0	0,011	0	

Tableau 6-7. Coefficients corrélation de Spearman et p-valeurs à Kodey en 2004

Kodey 2004	Rendement en paille	Rendement en grain	Indice de récolte	Poids des grains épi ⁻¹	Nombre d'épis poquet ⁻¹	Nombre talles poquet ⁻¹	Survie à la récolte	Survie au dé mariage	Nombre de poquets végétatifs	Nombre de poquets non matures	MOV	MOF
Rendement grain	0,779											
Indice de récolte	-0,441	0,146										
Poids des grains épi ⁻¹	0,327	0,583	0,396									
Nombre d'épis poquet ⁻¹	0,187	0,281	0,116	0,082								
Nombre talles poquet ⁻¹	0,224	0,272	0,097	0,54	0,155							
Survie à la récolte	0,337	0,257	-0,246	-0,304	-0,48	-0,271						
Survie au dé mariage	0,273	0,183	-0,24	-0,392	-0,177	-0,39	0,661					
Nombre de poquets végétatifs	-0,389	-0,399	0,008	-0,256	-0,194	-0,276	-0,169	0,073				
Nombre de poquets non matures	-0,309	-0,326	0,023	-0,09	-0,2	-0,053	-0,128	-0,061	0,422			
MOV	0,375	0,405	-0,046	0,224	0,039	0,063	0,135	0,122	-0,142	-0,104		
MOF	0,274	0,306	-0,05	0,168	0,031	0,026	0,077	0,081	-0,097	-0,079	0,945	
	0	0	0,527	0,032	0,692	0,747	0,331	0,305	0,217	0,316	0	

Tableau 6-8. Coefficients corrélation de Spearman et p-valeurs tous sites confondus en 2004

Tous sites 2004	Rendement		Indice de récolte	Poids des grains épi ⁻¹	Nombre d'épis poquet ⁻¹	Nombre talles poquet ⁻¹	Survie à la récolte	Nombre de poquets non matures		MOV	
	en paille	en grain						poquets végétatifs	poquets matures		
Rendement grain	0,705										
Indice de récolte	-0,35	0,312									
Poids des grains épi ⁻¹	0,451	0,547	0,195								
Nombre d'épis poquet ⁻¹	0,335	0,403	0,052	0,114							
Nombre talles poquet ⁻¹	0,444	0,294	-0,189	0,402	0,283						
Survie à la récolte	0,388	0,6	0,272	0	-0,139	-0,062					
Survie au démariage	-0,104	0,107	0,256	-0,322	-0,203	-0,454	0,399				
Nombre de poquets végétatifs	-0,503	-0,547	-0,085	-0,279	-0,249	-0,314	-0,509	0,266			
Nombre de poquets non matures	-0,395	-0,393	0,099	-0,171	-0,177	-0,241	-0,272	0,254	0,445		
MOV	-0,103	0,035	0,192	-0,074	-0,053	-0,059	0,139	0,16	0,019	0,035	
MOF	0,024	0,45	0	0,106	0,243	0,193	0,002	0	0,673	0,443	
	0,284	0,322	0,022	0,172	0,102	0,144	0,213	-0,091	-0,24	-0,225	-0,01
	0	0	0,637	0	0,026	0,001	0	0,045	0	0	0,828

Tableau 6-9. Coefficients corrélation de Spearman et p-valeurs à Banizoumbou en 2005

Banizoumbou 2005	Rendement		Indice de récolte	Poids des grains épi ⁻¹	Nombre d'épis poquet ⁻¹	Nombre talles poquet ⁻¹	Survie à la récolte	Nombre de poquets non matures		MOV	
	en paille	en grain						poquets végétatifs	poquets matures		
Rendement grain	0,663										
Indice de récolte	-0,341	0,4									
Poids des grains épi ⁻¹	0,524	0,78	0,348								
Nombre d'épis poquet ⁻¹	0,635	0,78	0,183	0,493							
Nombre talles poquet ⁻¹	0,47	0,41	-0,102	0,418	0,452						
Survie à la récolte	0,229	0,41	0,271	-0,031	0,246	0,014					
Survie au démariage	-0,028	0,17	0,182	-0,131	0,078	-0,176	0,42				
Nombre de poquets végétatifs	-0,406	-0,5	-0,213	-0,395	-0,53	-0,354	-0,508	0,08			
Nombre de poquets non matures	-0,252	-0,3	-0,021	-0,198	-0,149	-0,097	-0,216	0,072	0,192		
MOV	0,095	0,1	-0,018	0,009	0,116	0,23	0,283	0,12	-0,204	-0,174	
MOF	0,193	0,17	0,807	0,903	0,111	0,001	0	0,1	0,005	0,017	
	0,321	0	-0,287	0,066	0,038	-0,052	-0,053	-0,044	-0,063	0,098	0,279

	0	0,96	0	0,365	0,604	0,478	0,467	0,551	0,389	0,18	0
--	---	------	---	-------	-------	-------	-------	-------	-------	------	---

Tableau 6-10. Coefficients corrélation de Spearman et p-valeurs à Bagoua en 2005

Bagoua 2005	Rendement		Indice de récolte	Poids des grains épi ¹	Nombre d'épis poquet ¹	Nombre talles poquet ¹	Survie à la récolte	Survie au démariage	Nombre de poquets végétatifs	Nombre de poquets non matures	Nombre de poquets matures	MOV
	en paille	en grain										
Rendement grain	0,688											
	0											
Indice de récolte	-0,464	0,23										
	0	0										
Poids des grains épi ¹	0,39	0,73	0,348									
	0	0	0									
Nombre d'épis poquet ¹	0,33	0,39	-0,013	0,157								
	0	0	0,855	0,031								
Nombre talles poquet ¹	0,299	0,35	-0,009	0,329	0,287							
	0	0	0,899	0	0							
Survie à la récolte	0,225	0,23	-0,046	-0,233	-0,391	-0,059						
	0,002	0	0,532	0,001	0	0,419						
Survie au démariage	-0,009	0	0,027	-0,233	0,043	-0,048	0,337					
	0,904	0,97	0,712	0,001	0,553	0,513	0					
Nombre de poquets végétatifs	-0,363	-0,4	0,1	-0,202	-0,078	-0,208	-0,352	-0,05				
	0	0	0,169	0,005	0,284	0,004	0	0,494				
Nombre de poquets non matures	-0,348	-0,3	0,147	-0,238	-0,171	-0,216	-0,014	0,168	0,354			
	0	0	0,043	0,001	0,018	0,003	0,847	0,021	0			
MOV	0,083	0,14	0,045	-0,023	0,063	0,19	0,284	0,375	-0,343	-0,008		
	0,255	0,05	0,536	0,757	0,392	0,009	0	0	0	0,91		
MOF	0,307	0,3	-0,039	0,267	0,339	0,287	-0,175	-0,194	-0,142	-0,286	0,093	
	0	0	0,593	0	0	0	0,016	0,007	0,052	0	0,202	

Tableau 6-11. Coefficients corrélation de Spearman et p-valeurs à Kodey en 2005

Kodey 2005	Rendement		Indice de récolte	Poids des grains épi ¹	Nombre d'épis poquet ¹	Nombre talles poquet ¹	Survie à la récolte	Survie au démariage	Nombre de poquets végétatifs	Nombre de poquets non matures	Nombre de poquets matures	MOV
	en paille	en grain										
Rendement grain	0,552											
	0											
Indice de récolte	-0,54	0,17										
	0	0,02										
Poids des grains épi ¹	0,092	0,36	0,255									
	0,209	0	0									
Nombre d'épis poquet ¹	0,146	0,28	0,052	-0,265								
	0,045	0	0,481	0								
Nombre talles poquet ¹	0,232	0,36	-0,066	0,317	0,021							
	0,001	0	0,364	0	0,776							
Survie à la récolte	0,411	0,48	-0,225	-0,192	-0,186	0,193						
	0	0	0,002	0,008	0,01	0,008						
Survie au démariage	0,149	0,13	-0,026	-0,111	0,037	-0,094	0,196					
	0,041	0,08	0,725	0,128	0,616	0,2	0,007					
Nombre de poquets végétatifs	-0,14	-0,3	0,046	0,192	-0,009	-0,203	-0,592	0,038				
	0,055	0	0,527	0,008	0,898	0,005	0	0,607				

Nombre de poquets non matures	-0,061	-0,1	0,016	-0,014	0,026	-0,189	-0,311	0,074	0,488		
MOV	0,401	0,05	0,831	0,843	0,722	0,009	0	0,311	0	-0,093	
	0,249	0,2	-0,092	-0,02	0,19	0,067	-0,014	0,04	-0,241	0,203	
	0,001	0,01	0,207	0,78	0,009	0,359	0,854	0,583	0,001	0,203	
MOF	-0,08	0,25	0,22	-0,018	0,097	0,137	0,339	0,165	-0,275	-0,359	-
	0,274	0	0,002	0,804	0,184	0,061	0	0,023	0	0	0,345

Tableau 6-12. Coefficients corrélation de Spearman et p-valeurs tous sites confondus en 2005

Tous sites 2005	Rendement en paille	Rendement en grain	Indice de récolte	Poids des grains épi ¹	Nombre d'épis poquet ¹	Nombre talles poquet ¹	Survie à la récolte	Survie au démarrage	Nombre de poquets végétatifs	Nombre de poquets non matures	MOV	MOF
Rendement grain	0,543											
	0											
Indice de récolte	-0,412	0,42										
	0	0										
Poids des grains épi ¹	0,292	0,69	0,416									
	0	0	0									
Nombre d'épis poquet ¹	0,316	0,44	0,102	0,13								
	0	0	0,015	0,002								
Nombre talles poquet ¹	0,307	0,41	0,055	0,394	0,246							
	0	0	0,192	0	0							
Survie à la récolte	0,28	0,39	0,067	-0,072	-0,224	0,09						
	0	0	0,111	0,087	0	0,031						
Survie au démarrage	0,042	0,1	0,06	-0,139	0,059	-0,103	0,263					
	0,313	0,02	0,156	0,001	0,159	0,014	0					
Nombre de poquets végétatifs	-0,202	-0,4	-0,182	-0,148	-0,17	-0,269	-0,471	0,033				
	0	0	0	0	0	0	0	0,439				
Nombre de poquets non matures	-0,11	-0,4	-0,225	-0,25	-0,051	-0,25	-0,313	0,071	0,519			
	0,009	0	0	0	0,229	0	0	0,093	0			
MOV	0,113	0,16	0,023	0,021	0,018	0,178	0,274	0,135	-0,174	-0,131		
	0,007	0	0,579	0,62	0,676	0	0	0,001	0	0,002		
MOF	0,168	0,15	-0,018	0,101	0,151	0,133	0,058	-0,014	-0,164	-0,204	-	
	0	0	0,663	0,016	0	0,001	0,17	0,734	0	0	0,165	0

7. Tableaux de moyennes, analyse de variance et comparaisons multiples par année

Tableau 7-1. ANOVA (2003).....	7-19
Tableau 7-2. Moyennes et p-valeurs 2003	7-20
Tableau 7-3. Comparaisons multiples (Bonferroni) (2003)	7-22
Tableau 7-4. ANOVA (2004).....	7-23
Tableau 7-5. Moyennes et p-valeurs (2004).....	7-24
Tableau 7-6. Comparaisons multiples (Bonferroni) (2004)	7-26
Tableau 7-7. ANOVA (2005).....	7-27
Tableau 7-8. Moyennes et p-valeurs (2005).....	7-28
Tableau 7-9. Comparaisons multiples (Bonferroni) (2005).....	7-30

Tableau 7-1. ANOVA (2003)

Type 3 Tests of Fixed Effects		Rdmt paille	Rdt grain	HI	Pds grains	epis/pkt	talles/pkt	taux survie	survie dém
Effect	Num DF	Pr > F	Pr > F	Pr > F	Pr > F	Pr > F	Pr > F	Pr > F	Pr > F
SITE	2	<.0001	<.0001	<.0001	<.0001	0.7714	<.0001	<.0001	<.0001
STRAT	4	<.0001	<.0001	0.2109	<.0001	<.0001	<.0001	<.0001	0.0002
SITE *STRAT	8	<.0001	<.0001	<.0001	0.0139	<.0001	<.0001	<.0001	<.0001
FERT	2	0.0346	0.0098	0.6398	0.5982	0.0072	0.0151	0.8337	0.0016
SITE *FERT	4	0.8076	0.1556	0.0352	0.5754	0.5764	0.2692	0.0293	0.6128
STRAT *FERT	8	0.4271	0.0595	0.4133	0.1101	0.1914	0.2583	0.0225	0.7846
SITE *STRAT *FERT	16	0.9055	0.1876	0.6294	0.4409	0.2571	0.4584	0.9108	0.1339
VAR	2	<.0001	0.0038	<.0001	<.0001	0.0628	<.0001	0.0611	<.0001
SITE *VAR	4	0.4917	0.1837	0.0005	0.4604	0.7006	0.8450	0.6611	0.0034
STRAT *VAR	8	0.6124	0.4788	0.8801	0.6401	0.9189	0.7560	0.0644	0.0071
SITE *STRAT *VAR	16	0.8857	0.7353	0.4128	0.6578	0.4207	0.2712	0.6063	0.0187
FERT *VAR	4	0.1297	0.0698	0.2731	0.2010	0.3205	0.7728	0.8797	0.3836
SITE *FERT *VAR	8	0.0554	0.1401	0.6110	0.8200	0.5285	0.9018	0.9506	0.7768
STRAT *FERT *VAR	16	0.0565	0.1331	0.5763	0.9711	0.6109	0.8635	0.9425	0.8756
SITE*STRAT*FERT*VAR	32	0.4849	0.8946	0.2063	0.5774	0.3609	0.7483	0.7023	0.8180

Rdmt paille = rendement en paille, Rdmt grain = rendement en grain, HI = indice de récolte, Pds grains = poids des grains par épi, epis/pkt = nombre d'épis par poquet, talles/pkt = nombre de talles par poquet, taux survie = taux de survie à la récolte, survie dém = taux de survie au démarrage

Tableau 7-2. Moyennes et p-valeurs 2003

Variable	SITE	Mean	FERTILISATION				VARIETE					
			Mean	Bagoua	Bani	Kodey	Mean	Bagoua	Bani	Kodey		
Rendement en paille (kg ha ⁻¹)	Bagoua	2041,8	DAP	1956	2115	2686	1065,7	ICMV IS 893	1723	1921	2470	779,1
	Bani	2676	DAP + Urée	1985	2052	2845	1057,7	Local	2208	2423	3051	1150,3
	Kodey	956,3	Témoin	1734	1959	2497	745,4	ZATIB	1743	1781	2507	939,5
	p-valeur	<,0001	p-valeur	0,0346	n.s.	n.s.	0,0004	p-valeur	<,0001	<,0001	n.s.	0,0003
Rendement en grain (kg ha ⁻¹)	Bagoua	692,8	DAP	654,2	704,9	808,9	448,8	ICMV IS 893	672,6	752,4	844	421,2
	Bani	812,9	DAP + Urée	664,6	687,8	859	446,9	Local	650,2	713,8	864,9	371,9
	Kodey	395,8	Témoin	582,8	685,8	770,7	291,8	ZATIB	578,8	612,2	729,7	394,4
	p-valeur	<,0001	p-valeur	0,0098	n.s.	n.s.	<,0001	p-valeur	0,0038	0,0007	n.s.	n.s.
Indice de récolte (%)	Bagoua	23,667	DAP	24,056	23,32	21,95	26,9	ICMV IS 893	26,887	26,026	24,269	30,37
	Bani	22,072	DAP + Urée	23,906	23,381	22,01	26,33	Local	21,149	21,344	20,74	21,363
	Kodey	25,783	Témoin	23,56	24,3	22,255	24,12	ZATIB	23,486	23,631	21,207	25,62
	p-valeur	<,0001	p-valeur	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	p-valeur	<,0001	0,0021	<,0001	<,0001
Poids des grains épi ⁻¹ (g)	Bagoua	35,386	DAP	31,245	35,42	30,66	27,658	ICMV IS 893	30,411	35,97	29,91	25,35
	Bani	30,777	DAP + Urée	30,994	34,89	31,65	26,44	Local	33,465	37,86	34,04	28,5
	Kodey	26,425	Témoin	30,348	35,85	30,03	25,17	ZATIB	28,711	32,33	28,38	25,42
	p-valeur	<,0001	p-valeur	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	p-valeur	<,0001	0,003	0,0018	0,0778
Nombre d'épis poquet ⁻¹	Bagoua	2,8367	DAP	2,967	3,008	2,926	*	ICMV IS 893	2,976	2,917	3,035	*
	Bani	2,863	DAP + Urée	2,936	2,93	2,941	*	Local	2,859	2,894	2,825	*
	Kodey	*	Témoin	2,647	2,572	2,722	*	ZATIB	2,714	2,699	2,73	*
	p-valeur	n.s.	p-valeur	0,0072	0,0125	n.s.		p-valeur	n.s.	n.s.	n.s.	
Nombre de talles poquet ⁻¹	Bagoua	3,446	DAP	3,344	3,769	3,375	2,888	ICMV IS 893	3,1678	3,35	3,426	2,728
	Bani	3,418	DAP + Urée	3,2493	3,399	3,536	2,8127	Local	3,479	3,797	3,702	2,937
	Kodey	2,7493	Témoin	3,0203	3,171	3,344	2,547	ZATIB	2,9671	3,191	3,128	2,582
	p-valeur	<,0001	p-valeur	0,0151	0,0373	n.s.	0,0347	p-valeur	<,0001	0,0287	0,0311	0,0357
Taux de survie à la récolte (%)	Bagoua	72,83	DAP	79,47	71,08	87,85	*	ICMV IS 893	82,39	75,64	89,14	*
	Bani	87,54	DAP + Urée	80,4	70,86	89,93	*	Local	77,43	68,97	85,9	*
	Kodey	*	Témoin	80,69	76,54	84,83	*	ZATIB	80,73	73,88	87,57	*
	p-valeur	<,0001	p-valeur	n.s.	n.s.	n.s.		p-valeur	n.s.	n.s.	n.s.	
Taux de survie au démarrage (%)	Bagoua	73,13	DAP	80,04	70,14	88,54	81,45	ICMV IS 893	85,46	75,34	92,76	88,28
	Bani	89,905	DAP + Urée	81,7	72,01	90,27	82,81	Local	77,26	70,62	86,89	74,29
	Kodey	83,6	Témoin	84,9	77,25	90,91	86,54	ZATIB	83,91	73,44	90,06	88,23
	p-valeur	<,0001	p-valeur	0,0016	n.s.	n.s.	0,0299	p-valeur	<,0001	n.s.	0,0045	<,0001
Nombre de poquets végétatifs	Bagoua	0,6	DAP	0,1222	0,156	0,0889	*	ICMV IS 893	0,467	0,1333	0,8	*
	Bani	0,674	DAP + Urée	0,1222	0,244	0	*	Local	0,7	0,889	0,511	*
	Kodey	*	Témoin	1,667	1,4	1,933	*	ZATIB	0,744	0,778	0,711	*
	p-valeur											
Nombre de poquets non matures	Bagoua	0,3407	DAP	0,1333	0,1333	0,1333	*	ICMV IS 893	0,278	0,222	0,333	*
	Bani	0,6	DAP + Urée	0,2333	0,267	0,2	*	Local	0,578	0,378	0,778	*
	Kodey	*	Témoin	1,044	0,622	1,467	*	ZATIB	0,556	0,422	0,689	*
	p-valeur											

Moyennes et p-valeurs 2003 (suite du Tableau 7-2)

Variable	STRATE	Mean	Bagoua	Bani	Kodey	Variable	STRATE	Mean	Bagoua	Bani	Kodey
Rendement en paille (kg ha ⁻¹)	FT03	1762,7	2070	1791	1427	Nombre de talles poquet ⁻¹	FT03	3,366	4,315	2,973	2,8089
	NF	890,1	1081	1076,3	513,1		NF	2,4337	2,554	2,565	2,181
	PA01	1800	2139	2493	767,1		PA01	3,338	3,62	3,449	2,945
	PA02	1817	1940	2487	1024		PA02	3,076	3,048	3,396	2,784
	PA03	3187	2979	5534	1049,9		PA03	3,81	3,693	4,709	3,027
	p-valeur	<,0001	<,0001	<,0001	<,0001		p-valeur	<,0001	<,0001	<,0001	<,0001
Rendement en grain (kg ha ⁻¹)	FT03	606,8	658,4	684,5	477,5	Taux de survie à la récolte (%)	FT03	72,91	58,39	87,43	*
	NF	331,5	423,8	389,3	181,5		NF	78,01	75,72	80,29	*
	PA01	637	793,1	746,8	371,3		PA01	78,49	73,62	83,36	*
	PA02	622,8	647,8	748,5	471,9		PA02	86,37	82,21	90,53	*
	PA03	971,1	941	1495	476,9		PA03	85,14	74,21	96,07	*
	p-valeur	<,0001	<,0001	<,0001	<,0001		p-valeur	<,0001	<,0001	<,0001	<,0001
Indice de récolte (%)	FT03	23,449	22,389	25,089	22,87	Taux de survie au démarrage (%)	FT03	81,37	60,12	93,85	90,14
	NF	23,731	25,486	23,498	22,21		NF	83,74	80,78	86,81	83,62
	PA01	24,816	24,75	20,821	28,88		PA01	77,34	70,03	80,53	81,45
	PA02	23,913	23,459	20,937	27,34		PA02	83,86	81,27	90,3	80,01
	PA03	23,295	22,252	20,015	27,62		PA03	84,76	73,46	98,041	82,77
	p-valeur	n.s.	0,0021	<,0001	<,0001		p-valeur	0,0002	<,0001	<,0001	<,0001
Poids des grains épi ⁻¹ (g)	FT03	31,739	36,83	29,73	28,66	Nombre de poquets végétatifs	FT03	0	0	0	*
	NF	25,441	30,34	23,85	22,13		NF	2,87	2,41	3,333	*
	PA01	31,681	37,42	32,52	25,1		PA01	0,0185	0	0,037	*
	PA02	31,757	33,12	32,75	29,4		PA02	0,296	0,593	0	*
	PA03	33,69	39,22	35,03	26,84		PA03	0	0	0	*
	p-valeur	<,0001	0,0002	<,0001	0,0038						
Nombre d'épis poquet ⁻¹	FT03	3,024	3,373	2,675	*	Nombre de poquets non matures	FT03	0,1852	0,037	0,333	*
	NF	1,9685	1,9299	2,007	*		NF	1,611	1,111	2,111	*
	PA01	2,8933	3,016	2,771	*		PA01	0,1111	0,037	0,1852	*
	PA02	2,4689	2,456	2,4818	*		PA02	0,426	0,519	0,333	*
	PA03	3,895	3,409	4,381	*		PA03	0,0185	0	0,037	*
	p-valeur	<,0001	<,0001	<,0001	<,0001						

Tableau 7-3. Comparaisons multiples (Bonferroni) (2003)

Effect	Differences of Least Squares Means		Rdmt paille	Rdt grain	HI	Pds grains	epis/pkt	talles/pkt	taux survie	survie dém
			Pr > F	Pr > F	Pr > F	Pr > F	Pr > F	Pr > F	Pr > F	Pr > F
FERT	DAP	DAP + Urée	0,7812	0,7197	0,782	0,7806	0,7784	0,4023	0,6495	0,233
FERT	DAP	Témoin	0,0343	0,0137	0,3595	0,321	0,0045	0,0044	0,5521	0,0005
FERT	DAP + Urée	Témoin	0,0168	0,0048	0,5222	0,4751	0,0103	0,0436	0,8884	0,0212
STRAT	FT03	NF	<,0001	<,0001	0,6864	<,0001	<,0001	<,0001	0,0554	0,186
STRAT	FT03	PA01	0,7845	0,4168	0,051	0,9605	0,366	0,8504	0,0362	0,0247
STRAT	FT03	PA02	0,6861	0,6681	0,507	0,9874	0,0002	0,048	<,0001	0,1643
STRAT	FT03	PA03	<,0001	<,0001	0,8252	0,0944	<,0001	0,0025	<,0001	0,0587
STRAT	NF	PA01	<,0001	<,0001	0,121	<,0001	<,0001	<,0001	0,8562	0,0004
STRAT	NF	PA02	<,0001	<,0001	0,795	<,0001	0,0006	<,0001	0,0018	0,9454
STRAT	NF	PA03	<,0001	<,0001	0,5323	<,0001	<,0001	<,0001	0,0076	0,5682
STRAT	PA01	PA02	0,896	0,7013	0,1963	0,9479	0,0035	0,0734	0,0032	0,0003
STRAT	PA01	PA03	<,0001	<,0001	0,03	0,0851	<,0001	0,0013	0,0127	<,0001
STRAT	PA02	PA03	<,0001	<,0001	0,3767	0,0975	<,0001	<,0001	0,6413	0,6155
VAR	ICMV IS 89305	Local	<,0001	0,4384	<,0001	0,0008	0,2963	0,0063	0,0165	<,0001
VAR	ICMV IS 89305	ZATIB	0,8525	0,0013	<,0001	0,0605	0,0197	0,0766	0,419	0,2637
VAR	Local	ZATIB	<,0001	0,0138	<,0001	<,0001	0,1941	<,0001	0,1097	<,0001
SITE	Bagoua	Banizoumbou	<,0001	<,0001	0,0034	<,0001	0,773	0,8061	<,0001	<,0001
SITE	Bagoua	Kodey	<,0001	<,0001	0,0001	<,0001	*	<,0001	*	<,0001
SITE	Banizoumbou	Kodey	<,0001	<,0001	<,0001	<,0001	*	<,0001	*	<,0001

Rdmt paille = rendement en paille, Rdmt grain = rendement en grain, HI = indice de récolte, Pds grains = poids des grains par épi, epis/pkt = nombre d'épis par poquet, talles/pkt = nombre de talles par poquet, taux survie = taux de survie à la récolte, survie dém = taux de survie au démariage

Tableau 7-4. ANOVA (2004)

Type 3 Tests of Fixed Effects		Rdmt paille	Rdt grain	HI	Pds grains	epis/pkt	talles/pkt	taux survie	survie dém
Effect	Num DF	Pr > F	Pr > F	Pr > F	Pr > F	Pr > F	Pr > F	Pr > F	Pr > F
SITE	2	<.0001	<.0001	<.0001	<.0001	0.0804	<.0001	<.0001	<.0001
STRAT	5	<.0001	<.0001	<.0001	<.0001	<.0001	<.0001	<.0001	<.0001
SITE *STRAT	10	<.0001	<.0001	<.0001	<.0001	0.0318	<.0001	<.0001	<.0001
FERT	2	<.0001	<.0001	0.0076	0.0061	0.0002	0.0442	<.0001	<.0001
SITE *FERT	4	0.8920	0.0111	<.0001	0.0046	0.3813	0.2483	<.0001	<.0001
STRAT *FERT	10	0.0361	0.0394	0.1187	0.1617	0.3089	0.2365	0.0032	0.2688
SITE *STRAT *FERT	20	0.6107	0.5557	0.0204	0.1852	0.7134	0.2746	0.0562	0.2887
VAR	2	0.0026	<.0001	<.0001	<.0001	0.3784	<.0001	<.0001	<.0001
SITE *VAR	4	0.0031	0.1875	<.0001	0.0003	0.0034	<.0001	0.4480	<.0001
STRAT *VAR	10	0.2387	0.5972	0.4965	0.6074	0.0883	0.1971	0.5735	0.0170
SITE *STRAT *VAR	20	0.5450	0.6968	0.4294	0.6679	0.6197	0.6419	0.3264	0.0085
FERT *VAR	4	0.9449	0.7442	0.5561	0.7971	0.7512	0.7524	0.8509	0.3742
SITE *FERT *VAR	8	0.5574	0.7174	0.3007	0.1989	0.7218	0.9097	0.9515	0.3762
STRAT *FERT *VAR	20	0.8347	0.6861	0.4679	0.2473	0.1283	0.5541	0.7869	0.0120
SITE*STRAT*FERT*VAR	40	0.3906	0.8822	0.7000	0.0922	0.2476	0.9900	0.9001	0.0536

Rdmt paille = rendement en paille, Rdmt grain = rendement en grain, HI = indice de récolte, Pds grains = poids des grains par épi, epis/pkt = nombre d'épis par poquet, talles/pkt = nombre de talles par poquet, taux survie = taux de survie à la récolte, survie dém = taux de survie au démarrage

Tableau 7-5. Moyennes et p-valeurs (2004)

Variable	SITE	Mean	FERTILISATION				VARIETE					
			Mean	Bagoua	Bani	Kodey	Mean	Bagoua	Bani	Kodey		
Rendement en paille (kg ha ⁻¹)	Bagoua	1494,3	DAP	1323,3	1536,9	828,7	1604,2	ICMV IS 893	1315,2	1499,1	815,5	1621,8
	Bani	742,2	DAP + Urée	1368,9	1644,3	834,6	1628	Local	1311,8	1720,6	700,7	1514
	Kodey	1539,5	Témoin	1088,1	1301,6	556,4	1387	ZATIB	1155	1263	711,2	1482,6
	p-valeur	<,0001	p-valeur	<,0001	0,0026	<,0001	0,0479	p-valeur	0,0026	<,0001	n.s.	n.s.
Rendement en grain (kg ha ⁻¹)	Bagoua	802,4	DAP	717,6	862,7	628,9	661,2	ICMV IS 893	747,6	874,3	673,3	692,5
	Bani	571,5	DAP + Urée	720,1	807,8	642,5	710,1	Local	612,5	748,5	455,1	628,1
	Kodey	654,2	Témoin	591	736,5	426,9	591,4	ZATIB	671,9	784,3	586	642,2
	p-valeur	<,0001	p-valeur	<,0001	0,0178	<,0001	0,008	p-valeur	<,0001	0,0148	0,0003	n.s.
Indice de récolte (%)	Bagoua	30,571	DAP	31,212	31,733	35,859	26,043	ICMV IS 893	31,445	31,935	36,251	26,326
	Bani	34,341	DAP + Urée	30,388	28,9	34,94	27,321	Local	28,073	26,695	31,17	26,467
	Kodey	26,564	Témoin	29,705	31,08	31,96	26,33	ZATIB	31,814	33,083	35,6	26,9
	p-valeur	<,0001	p-valeur	0,0076	0,0025	0,0002	n.s.	p-valeur	<,0001	<,0001	0,0006	n.s.
Poids des grains épi ¹ (g)	Bagoua	37,716	DAP	34,71	39,476	29,58	35,07	ICMV IS 893	33,103	38,63	28,8	31,71
	Bani	29,491	DAP + Urée	34,616	36,65	29,366	37,83	Local	36,246	37,6	31,19	39,77
	Kodey	34,691	Témoin	32,69	37,03	29,53	31,16	ZATIB	32,717	36,91	28,48	32,59
	p-valeur	<,0001	p-valeur	0,0061	n.s.	n.s.	<,0001	p-valeur	<,0001	n.s.	n.s.	<,0001
Nombre d'épis poquet ¹	Bagoua	3,1171	DAP	3,2293	3,345	3,043	3,3	ICMV IS 893	3,1309	2,956	3,223	3,219
	Bani	2,931	DAP + Urée	3,2192	3,124	3,043	3,487	Local	3,1175	3,281	2,655	3,408
	Kodey	3,1947	Témoin	2,7918	2,882	2,686	2,798	ZATIB	3,0001	3,114	2,926	2,9573
	p-valeur	n. s.	p-valeur	0,0002	0,0258	n.s.	0,016	p-valeur	n.s.	n.s.	0,0005	n.s.
Nombre de talles poquet ¹	Bagoua	3,8132	DAP	4,02	3,836	3,386	4,838	ICMV IS 893	3,8617	3,7	3,695	4,19
	Bani	3,5183	DAP + Urée	4,087	3,963	3,679	4,619	Local	4,304	4,281	3,352	5,262
	Kodey	4,566	Témoin	3,794	3,641	3,489	4,241	ZATIB	3,7377	3,458	3,504	4,246
	p-valeur	<,0001	p-valeur	0,0442	n.s.	n.s.	n.s.	p-valeur	<,0001	<,0001	n.s.	<,0001
Taux de survie à la récolte (%)	Bagoua	70,51	DAP	67,05	69,75	68,52	62,87	ICMV IS 893	71,99	78,19	66,07	71,7
	Bani	59,36	DAP + Urée	67,3	74,44	67,58	59,88	Local	54,28	62,09	49,47	51,26
	Kodey	63,78	Témoin	59,3	67,33	41,98	68,59	ZATIB	67,38	71,24	62,53	68,38
	p-valeur	<,0001	p-valeur	<,0001	n.s.	<,0001	0,0143	p-valeur	<,0001	<,0001	<,0001	<,0001
Taux de survie au démarrage (%)	Bagoua	87,98	DAP	81,67	86,27	91,35	67,39	ICMV IS 893	87,95	88,17	95,715	79,95
	Bani	92,144	DAP + Urée	83,37	88,51	91,858	69,74	Local	78,64	88,23	88,18	59,5
	Kodey	72,98	Témoin	88,06	89,15	93,22	81,82	ZATIB	86,52	87,53	92,53	79,49
	p-valeur	<,0001	p-valeur	<,0001	n.s.	n.s.	<,0001	p-valeur	<,0001	n.s.	<,0001	<,0001
Nombre de poquets végétatifs	Bagoua	5,586	DAP	3,093	4,074	4,481	0,722	ICMV IS 893	4,389	4,59	6,98	1,593
	Bani	8,204	DAP + Urée	3,29	2,63	6,39	0,852	Local	5,747	6,41	9,06	1,778
	Kodey	1,537	Témoin	8,944	10,06	13,74	3,037	ZATIB	5,191	5,76	8,57	1,241
	p-valeur	<,0001	p-valeur	<,0001	n.s.	n.s.	<,0001	p-valeur	<,0001	n.s.	<,0001	<,0001
Nombre de poquets non matures	Bagoua	4,13	DAP	3,654	4,278	5,278	1,407	ICMV IS 893	4,407	3,889	7,241	2,093
	Bani	6,228	DAP + Urée	3,685	3,981	5,093	1,981	Local	4,623	5,019	6,481	2,37
	Kodey	2,056	Témoin	5,074	4,13	8,315	2,778	ZATIB	3,383	3,481	4,963	1,704

Moyennes et p-valeurs 2004 (suite du Tableau 7-5)

Variable	STRATE	Mean	Bagoua	Bani	Kodey	Variable	STRATE	Mean	Bagoua	Bani	Kodey
Rendement en paille (kg ha ⁻¹)	FT03	1403,1	1459	671	2079	Nombre de talles poquet ⁻¹	FT03	3,737	3,362	3,507	4,342
	FT04	1476,4	1832	983	1614		FT04	4,511	4,775	3,652	5,107
	NF	694	1001,1	261,9	787,1		NF	3,286	3,339	2,951	3,542
	PA02	924	1050,5	440,5	1281		PA02	3,892	2,829	3,502	5,346
	PA03	1413,1	1849	894,4	1495,9		PA03	4,398	5,079	3,67	4,445
	PA04	1640,2	1773,2	1166,7	1981		PA04	3,965	3,495	3,785	4,615
	p-valeur	<,0001	<,0001	<,0001	<,0001		p-valeur	<,0001	<,0001	n.s.	<,0001
Rendement en grain (kg ha ⁻¹)	FT03	696,4	859,8	448,8	780,6	Taux de survie à la récolte (%)	FT03	72,26	76,54	62,51	77,73
	FT04	747,6	755,2	763,9	723,5		FT04	68,45	62,78	80,66	61,91
	NF	341,5	505,8	151,8	331,7		NF	47,29	62,09	18,79	61
	PA02	547,4	655,7	371,1	608,7		PA02	58,7	79,79	45,22	51,07
	PA03	732,5	880,1	651	666,5		PA03	60,33	56,38	61,36	63,24
	PA04	976,3	1157,6	957,1	814,4		PA04	80,26	85,46	87,61	67,72
	p-valeur	<,0001	<,0001	<,0001	<,0001		p-valeur	<,0001	<,0001	<,0001	<,0001
Indice de récolte (%)	FT03	30,246	32,86	33,25	24,62	Taux de survie au démarrage (%)	FT03	93,41	99,021	94,67	86,53
	FT04	30,204	26,334	36,16	28,123		FT04	75,8	63,94	95,194	68,26
	NF	26,736	28,763	25,63	25,607		NF	84,57	98,684	83,26	71,78
	PA02	32,869	32,852	37,04	28,876		PA02	83,72	98,837	90,11	62,2
	PA03	29,796	28,422	34,757	26,208		PA03	78,1	69,18	92,99	72,15
	PA04	32,614	34,19	37,699	25,952		PA04	90,6	98,194	96,633	76,98
	p-valeur	<,0001	<,0001	<,0001	0,0117		p-valeur	<,0001	<,0001	<,0001	<,0001
Poids des grains épi ⁻¹ (g)	FT03	32,229	37,19	27,05	32,45	Nombre de poquets végétatifs	FT03	5,778	7,04	10,3	0
	FT04	37,116	39,66	31,92	39,76		FT04	2,889	1,963	4,81	1,889
	NF	26,49	31,93	24,01	23,08		NF	11,44	15,33	15,78	3,222
	PA02	34,65	32,41	30,59	40,79		PA02	6,481	6,52	11,44	1,481
	PA03	35,78	44,26	29,26	33,8		PA03	2,272	0,593	4,556	1,667
	PA04	37,412	40,84	33,141	38,25		PA04	1,79	2,074	2,333	0,963
	p-valeur	<,0001	<,0001	0,0002	<,0001						
Nombre d'épis poquet ⁻¹	FT03	3,0204	3,077	2,66	3,324	Nombre de poquets non matures	FT03	3,42	2,407	7,63	0,222
	FT04	3,0817	3,105	2,949	3,191		FT04	3,173	2,296	4,185	3,037
	NF	2,63	2,543	2,368	2,93		NF	7,025	11,67	6,333	3,074
	PA02	2,7424	2,4939	2,555	3,171		PA02	4,901	2,852	9,56	2,296
	PA03	3,668	4,042	3,658	3,303		PA03	3,716	1,519	7,63	2
	PA04	3,3223	3,44	3,277	3,249		PA04	2,593	4,037	2,037	1,704
	p-valeur	<,0001	<,0001	<,0001	n.s.						

Tableau 7-6. Comparaisons multiples (Bonferroni) (2004)

Differences of Least Squares Means			Rdmt paille	Rdt grain	HI	Pds grains	epis/pkt	talles/pkt	taux survie	survie dém
Effect			Pr > F	Pr > F	Pr > F	Pr > F	Pr > F	Pr > F	Pr > F	Pr > F
FERT	DAP	DAP + Urée	0,3917	0,9179	0,1588	0,9115	0,9458	0,5845	0,8857	0,1423
FERT	DAP	Témoin	<,0001	<,0001	0,0038	0,0064	<,0001	0,0531	<,0001	<,0001
FERT	DAP + Urée	Témoin	<,0001	<,0001	0,1304	0,0089	<,0001	0,0133	<,0001	<,0001
STRAT	FT03	FT04	0,3311	0,1394	0,9598	<,0001	0,692	<,0001	0,1242	<,0001
STRAT	FT03	NF	<,0001	<,0001	<,0001	<,0001	0,0171	0,0081	<,0001	<,0001
STRAT	FT03	PA02	<,0001	<,0001	0,0017	0,0534	0,0652	0,3681	<,0001	<,0001
STRAT	FT03	PA03	0,8948	0,2964	0,5856	0,0035	<,0001	0,0001	<,0001	<,0001
STRAT	FT03	PA04	0,0018	<,0001	0,0043	<,0001	0,0514	0,1875	0,0013	0,0868
STRAT	FT04	NF	<,0001	<,0001	<,0001	<,0001	0,0057	<,0001	<,0001	<,0001
STRAT	FT04	PA02	<,0001	<,0001	0,0014	0,0366	0,0254	0,0004	<,0001	<,0001
STRAT	FT04	PA03	0,401	0,6636	0,6207	0,2671	0,0002	0,5123	0,0011	0,159
STRAT	FT04	PA04	0,03	<,0001	0,0037	0,8065	0,1201	0,0017	<,0001	<,0001
STRAT	NF	PA02	0,0011	<,0001	<,0001	<,0001	0,5622	0,0004	<,0001	0,6003
STRAT	NF	PA03	<,0001	<,0001	<,0001	<,0001	<,0001	<,0001	<,0001	<,0001
STRAT	NF	PA04	<,0001	<,0001	<,0001	<,0001	<,0001	<,0001	<,0001	0,0003
STRAT	PA02	PA03	<,0001	<,0001	0,0002	0,3228	<,0001	0,0036	0,51	0,0007
STRAT	PA02	PA04	<,0001	<,0001	0,7659	0,0197	0,0002	0,6752	<,0001	<,0001
STRAT	PA03	PA04	0,0027	<,0001	0,0007	0,1758	0,0258	0,0125	<,0001	<,0001
VAR	ICMV IS 89305	Local	0,9138	<,0001	<,0001	0,0003	0,8556	0,0004	<,0001	<,0001
VAR	ICMV IS 89305	ZATIB	0,0032	0,0031	0,4943	0,6682	0,2088	0,2895	0,0088	0,2172
VAR	Local	ZATIB	0,0022	0,0139	<,0001	<,0001	0,2803	<,0001	<,0001	<,0001
SITE	Bagoua	Banizoumbou	<,0001	<,0001	<,0001	<,0001	0,0792	0,0137	<,0001	0,0003
SITE	Bagoua	Kodey	0,3951	<,0001	<,0001	0,0004	0,4777	<,0001	0,0001	<,0001
SITE	Banizoumbou	Kodey	<,0001	<,0001	<,0001	<,0001	0,0143	<,0001	0,0119	<,0001

Rdmt paille = rendement en paille, Rdmt grain = rendement en grain, HI = indice de récolte, Pds grains = poids des grains par épi, epis/pkt = nombre d'épis par poquet, talles/pkt = nombre de talles par poquet, taux survie = taux de survie à la récolte, survie dém = taux de survie au démariage

Tableau 7-7. ANOVA (2005)

Type 3 Tests of Fixed Effects		Rdmt paille	Rdt grain	HI	Pds grains	epis/pkt	talles/pkt	taux survie	survie dém
Effect	Num DF	Pr > F	Pr > F	Pr > F	Pr > F	Pr > F	Pr > F	Pr > F	Pr > F
SITE	2	0.7913	<.0001	<.0001	<.0001	<.0001	<.0001	<.0001	0.5857
STRAT	6	<.0001	<.0001	0.5243	<.0001	<.0001	<.0001	<.0001	<.0001
SITE *STRAT	12	<.0001	<.0001	<.0001	<.0001	<.0001	0.0002	<.0001	<.0001
FERT	2	<.0001	<.0001	0.0001	0.0002	0.4065	<.0001	0.0004	<.0001
SITE *FERT	4	0.0001	<.0001	0.0263	<.0001	<.0001	0.0122	<.0001	0.0083
STRAT *FERT	12	0.0433	0.0171	0.4010	0.5136	0.8103	0.5869	<.0001	0.4961
SITE *STRAT *FERT	24	0.2188	0.2210	0.3152	0.4028	0.0060	0.5794	0.0006	0.1470
VAR	2	0.0170	<.0001	<.0001	<.0001	0.0064	<.0001	<.0001	<.0001
SITE *VAR	4	0.7606	0.0150	0.0840	0.6023	0.1391	0.4431	0.0026	0.0073
STRAT *VAR	12	0.7217	0.3107	0.0638	0.0725	0.2322	0.6210	0.0533	0.6522
SITE *STRAT *VAR	24	0.0518	0.0074	0.7490	0.0721	0.3939	0.9111	0.3893	0.0017
FERT *VAR	4	0.5943	0.3766	0.8256	0.0519	0.1253	0.8821	0.0302	0.5427
SITE *FERT *VAR	8	0.8861	0.7145	0.9364	0.8187	0.1600	0.4411	0.4249	0.0213
STRAT *FERT *VAR	24	0.9809	0.4680	0.6902	0.8003	0.5926	0.8630	0.9197	0.4414
SITE*STRAT*FERT*VAR	48	0.5399	0.4766	0.5156	0.3488	0.1797	0.8464	0.7692	0.5038

Rdmt paille = rendement en paille, Rdmt grain = rendement en grain, HI = indice de récolte, Pds grains = poids des grains par épi, epis/pkt = nombre d'épis par poquet, talles/pkt = nombre de talles par poquet, taux survie = taux de survie à la récolte, survie dém = taux de survie au démarrage

Tableau 7-8. Moyennes et p-valeurs (2005)

Variable	SITE	Mean	FERTILISATION				VARIETE					
			Mean	Bagoua	Bani	Kodey	Mean	Bagoua	Bani	Kodey		
Rendement en paille (kg ha ⁻¹)	Bagoua	901,5	DAP	935	889,7	1005,3	910	ICMV IS 8930	906,1	917	896	905,2
	Bani	917,1	DAP + Urée	1044,1	935	1076,6	1120,8	Local	972,1	972,6	956,8	986,8
	Kodey	926,9	Témoin	766,3	879,9	669,3	749,7	ZATIB	867,3	815	898,3	888,5
	p-valeur	n.s.	p-valeur	<,0001	n.s.	<,0001	<,0001	p-valeur	0.0170	0,0212	n.s.	n.s.
Rendement en grain (kg ha ⁻¹)	Bagoua	442,7	DAP	409,2	423,6	515,7	288,2	ICMV IS 8930	443,5	481,2	538,1	311,1
	Bani	492,1	DAP + Urée	445,4	468,3	562,5	305,5	Local	410,1	443,4	462,2	324,6
	Kodey	292,91	Témoin	373,1	436,1	398,2	285	ZATIB	374,2	403,4	476,1	243,1
	p-valeur	<,0001	p-valeur	<,0001	n.s.	<,0001	n.s.	p-valeur	<,0001	0,0012	0,0114	<,0001
Indice de récolte (%)	Bagoua	29,216	DAP	26,38	28,459	29,389	21,293	ICMV IS 8930	28,934	30,614	32,247	23,94
	Bani	29,985	DAP + Urée	26,336	29,307	29,676	20,027	Local	26,097	27,7	28,186	22,405
	Kodey	22,213	Témoin	28,697	29,882	30,889	25,32	ZATIB	26,383	29,334	29,521	20,294
	p-valeur	<,0001	p-valeur	0,0001	n.s.	n.s.	<,0001	p-valeur	<,0001	0,0309	0,0003	0,0088
Poids des grains épi ⁻¹ (g)	Bagoua	22,4	DAP	21,2	22,968	24,148	16,483	ICMV IS 8930	20,97	22,598	22,564	17,746
	Bani	22,868	DAP + Urée	21,971	23,838	25,011	17,063	Local	23,377	24,454	25,252	20,427
	Kodey	17,473	Témoin	19,57	20,394	19,444	18,872	ZATIB	18,394	20,149	20,787	14,245
	p-valeur	<,0001	p-valeur	0,0002	0,0007	<,0001	n.s.	p-valeur	<,0001	<,0001	<,0001	<,0001
Nombre d'épis poquet ⁻¹	Bagoua	3,0822	DAP	2,7113	3,017	2,5979	2,5187	ICMV IS 8930	2,7703	3,0417	2,5921	2,677
	Bani	2,5421	DAP + Urée	2,7914	3,0643	2,7671	2,5429	Local	2,8282	3,297	2,5386	2,6494
	Kodey	2,6064	Témoin	2,7279	3,165	2,2612	2,758	ZATIB	2,6321	2,9082	2,4955	2,4927
	p-valeur	<,0001	p-valeur	n.s.	n.s.	<,0001	n.s.	p-valeur	0,0064	0,0092	n.s.	n.s.
Nombre de talles poquet ⁻¹	Bagoua	3,6657	DAP	3,6364	3,781	3,918	3,21	ICMV IS 8930	3,4692	3,526	3,609	3,273
	Bani	3,7633	DAP + Urée	3,798	3,872	4,262	3,262	Local	3,805	4,001	4,085	3,329
	Kodey	3,168	Témoin	3,1622	3,3446	3,11	3,032	ZATIB	3,3227	3,4703	3,595	2,9024
	p-valeur	<,0001	p-valeur	<,0001	0,0441	<,0001	n.s.	p-valeur	<,0001	0,0355	0,0019	0,0435
Taux de survie à la récolte (%)	Bagoua	66,42	DAP	72,68	64,57	81,13	72,33	ICMV IS 8930	76,5	72,41	87,22	69,86
	Bani	81,625	DAP + Urée	73,77	65,43	82,05	73,84	Local	63,88	56,75	71,47	63,41
	Kodey	67,82	Témoin	69,42	69,27	81,7	57,28	ZATIB	75,49	70,12	86,18	70,17
	p-valeur	<,0001	p-valeur	0,0004	n.s.	n.s.	<,0001	p-valeur	<,0001	<,0001	<,0001	0,0014
Taux de survie au démarrage (%)	Bagoua	94,451	DAP	93,419	93,821	92,588	93,848	ICMV IS 8930	94,897	94,635	95,225	94,831
	Bani	94,092	DAP + Urée	93,209	93,598	92,667	93,362	Local	93,179	94,228	92,024	93,283
	Kodey	94,241	Témoin	96,156	95,933	97,022	95,514	ZATIB	94,709	94,49	95,028	94,608
	p-valeur	n.s.	p-valeur	<,0001	<,0001	<,0001	0,004	p-valeur	<,0001	n.s.	<,0001	0,0434
Nombre de poquets végétatifs	Bagoua	1,603	DAP	2,18	0,81	0,587	5,143	ICMV IS 8930	3,778	1,603	1,952	7,78
	Bani	2,016	DAP + Urée	2,265	1,27	0,492	5,03	Local	4,206	1,667	2,016	8,94
	Kodey	8,037	Témoin	7,212	2,73	4,97	13,94	ZATIB	3,672	1,54	2,079	7,4
	p-valeur	n.s.	p-valeur	<,0001	<,0001	<,0001	0,004	p-valeur	<,0001	n.s.	<,0001	0,0434
Nombre de poquets non matures	Bagoua	2,37	DAP	2,312	2,079	0,444	4,413	ICMV IS 8930	2,852	2,333	0,508	5,714
	Bani	0,5556	DAP + Urée	2,312	1,746	0,254	4,937	Local	3,529	2,413	0,952	7,222
	Kodey	5,81	Témoin	4,111	3,286	0,968	8,079	ZATIB	2,354	2,365	0,2063	4,492

Variable	STRATE	Mean	Bagoua	Bani	Kodey	Variable	STRATE	Mean	Bagoua	Bani	Kodey
Rendement en paille (kg ha⁻¹)	<i>FT03</i>	792,4	667,7	689,8	1019,6	Nombre de talles poquet⁻¹	<i>FT03</i>	3,495	3,321	3,695	3,469
	<i>FT04</i>	830	913,4	922,7	654		<i>FT04</i>	3,511	3,464	4,263	2,808
	<i>FT05</i>	977,6	765,2	978,9	1188,7		<i>FT05</i>	3,6856	3,909	3,952	3,196
	<i>NF</i>	518	545,3	459,8	549,1		<i>NF</i>	2,757	2,783	3,109	2,38
	<i>PA03</i>	1175	1164,5	988,4	1372		<i>PA03</i>	3,5749	3,862	3,894	2,969
	<i>PA04</i>	1069,5	1083,2	1209	916,4		<i>PA04</i>	3,871	3,81	3,838	3,965
	<i>PA05</i>	1043,5	1171,6	1171	788		<i>PA05</i>	3,831	4,512	3,592	3,39
p-valeur	<,0001	<,0001	<,0001	<,0001	p-valeur	<,0001	0,0001	0,0003	<,0001		
Rendement en grain (kg ha⁻¹)	<i>FT03</i>	352,7	360	402,2	295,9	Taux de survie à la récolte (%)	<i>FT03</i>	71,51	65,75	80,52	68,27
	<i>FT04</i>	395,8	476,6	489,3	221,7		<i>FT04</i>	70,64	72,38	82,26	57,29
	<i>FT05</i>	406,8	379,2	484,1	357,2		<i>FT05</i>	78,3	74,85	89,07	70,96
	<i>NF</i>	224,1	241,6	263,1	167,6		<i>NF</i>	61,35	55,69	70,87	57,48
	<i>PA03</i>	530,9	557,6	709,4	325,6		<i>PA03</i>	75,34	69	86,97	70,05
	<i>PA04</i>	503,7	533,4	647,3	330,3		<i>PA04</i>	73,78	69,36	82,53	69,46
	<i>PA05</i>	450,7	550,4	449,5	352,2		<i>PA05</i>	72,76	57,93	79,15	81,21
p-valeur	<,0001	<,0001	<,0001	<,0001	p-valeur	<,0001	<,0001	<,0001	<,0001		
Indice de récolte (%)	<i>FT03</i>	27,633	31,52	31,14	20,24	Taux de survie au démariage (%)	<i>FT03</i>	94,092	93,909	94,674	93,69
	<i>FT04</i>	28,12	30,16	29,36	24,84		<i>FT04</i>	92,705	95,103	92,26	90,76
	<i>FT05</i>	26,316	28,864	28,89	21,2		<i>FT05</i>	96,306	97,429	95,99	95,5
	<i>NF</i>	26,545	27,55	29,65	22,43		<i>NF</i>	92,307	92,929	90,57	93,419
	<i>PA03</i>	27,313	28,68	34,821	18,436		<i>PA03</i>	95,919	94,98	97,092	95,684
	<i>PA04</i>	27,225	28,986	30,59	22,1		<i>PA04</i>	94,705	94,215	94,827	95,072
	<i>PA05</i>	26,812	28,747	25,45	26,24		<i>PA05</i>	93,797	92,593	93,235	95,562
p-valeur	n.s.	n.s.	<,0001	0,0004	p-valeur	<,0001	<,0001	<,0001	<,0001		
Poids des grains épi⁻¹ (g)	<i>FT03</i>	20,495	22,39	20,98	18,12	Nombre de poquets végétatifs	<i>FT03</i>	4,506	3,148	1,519	8,85
	<i>FT04</i>	20,999	24,28	22,6	16,122		<i>FT04</i>	3,173	1,037	1,296	7,19
	<i>FT05</i>	19,131	17,239	22,036	18,12		<i>FT05</i>	0,556	0,259	0,481	0,926
	<i>NF</i>	17,806	16,948	17,47	19		<i>NF</i>	9,06	4,93	7,67	14,59
	<i>PA03</i>	23,168	25,36	26,554	17,594		<i>PA03</i>	7,3	0,2222	0,37	21,3
	<i>PA04</i>	22,48	23,56	27,84	16,041		<i>PA04</i>	0,951	0,741	1,259	0,852
	<i>PA05</i>	22,316	27,034	22,59	17,32		<i>PA05</i>	1,654	0,889	1,519	2,556
p-valeur	<,0001	<,0001	<,0001	n. s.	p-valeur	<,0001	<,0001	<,0001	<,0001		
Nombre d'épis poquet⁻¹	<i>FT03</i>	2,4796	2,559	2,4059	2,4734	Nombre de poquets non matures	<i>FT03</i>	3,654	3,963	0,778	6,222
	<i>FT04</i>	2,6061	2,797	2,578	2,4433		<i>FT04</i>	2,753	2,296	0,37	5,593
	<i>FT05</i>	2,8021	3,062	2,5096	2,8352		<i>FT05</i>	2,123	2,778	0,1111	3,481
	<i>NF</i>	2,227	2,686	1,87	2,127		<i>NF</i>	3,84	3,148	0,815	7,556
	<i>PA03</i>	3,0484	3,389	3,0764	2,68		<i>PA03</i>	4,469	2,074	0,333	11
	<i>PA04</i>	3,087	3,409	2,844	3,0078		<i>PA04</i>	2,284	1,37	0,593	4,889
	<i>PA05</i>	2,9541	3,673	2,5109	2,678		<i>PA05</i>	1,259	0,963	0,889	1,926
p-valeur	<,0001	<,0001	<,0001	<,0001	p-valeur	<,0001	<,0001	<,0001	<,0001		

Tableau 7-9. Comparaisons multiples (Bonferroni) (2005)

Differences of Least Squares Means			Rdmt paille	Rdt grain	HI	Pds grains	epis/pkt	talles/pkt	taux survie	survie dém
Effect			Pr > F	Pr > F	Pr > F	Pr > F	Pr > F	Pr > F	Pr > F	Pr > F
FERT	DAP	DAP + Urée	0,0038	0,0048	0,944	0,1905	0,2208	0,1281	0,3477	0,5648
FERT	DAP	Témoin	<,0001	0,0049	0,0002	0,0057	0,804	<,0001	0,0053	<,0001
FERT	DAP + Urée	Témoin	<,0001	<,0001	0,0002	<,0001	0,3287	<,0001	0,0002	<,0001
STRAT	FT03	FT04	0,5112	0,0278	0,6095	0,5753	0,2052	0,9196	0,6264	0,013
STRAT	FT03	FT05	0,0013	0,0058	0,1672	0,1294	0,0013	0,2409	0,0002	<,0001
STRAT	FT03	NF	<,0001	<,0001	0,2535	0,0029	0,0118	<,0001	<,0001	0,0014
STRAT	FT03	PA03	<,0001	<,0001	0,7319	0,0031	<,0001	0,6234	0,0334	0,0012
STRAT	FT03	PA04	<,0001	<,0001	0,6679	0,0276	<,0001	0,021	0,2035	0,2718
STRAT	FT03	PA05	<,0001	<,0001	0,3889	0,0432	<,0001	0,0388	0,4837	0,5952
STRAT	FT04	FT05	0,0102	0,5746	0,0588	0,0381	0,0501	0,2837	<,0001	<,0001
STRAT	FT04	NF	<,0001	<,0001	0,0987	0,0004	0,0002	<,0001	<,0001	0,4749
STRAT	FT04	PA03	<,0001	<,0001	0,3936	0,0164	<,0001	0,6965	0,0091	<,0001
STRAT	FT04	PA04	<,0001	<,0001	0,3475	0,0999	<,0001	0,0273	0,0789	0,0004
STRAT	FT04	PA05	0,0002	0,0052	0,1703	0,1432	0,0005	0,0493	0,2354	0,0504
STRAT	FT05	NF	<,0001	<,0001	0,8105	0,1408	<,0001	<,0001	<,0001	<,0001
STRAT	FT05	PA03	0,0006	<,0001	0,2987	<,0001	0,0143	0,4951	0,0956	0,4731
STRAT	FT05	PA04	0,1089	<,0001	0,3406	0,0002	0,0045	0,2545	0,0117	0,0042
STRAT	FT05	PA05	0,2503	0,0252	0,6027	0,0004	0,1285	0,3699	0,002	<,0001
STRAT	NF	PA03	<,0001	<,0001	0,4238	<,0001	<,0001	<,0001	<,0001	<,0001
STRAT	NF	PA04	<,0001	<,0001	0,4756	<,0001	<,0001	<,0001	<,0001	<,0001
STRAT	NF	PA05	<,0001	<,0001	0,7788	<,0001	<,0001	<,0001	<,0001	0,0077
STRAT	PA03	PA04	0,0681	0,1704	0,9311	0,4483	0,6922	0,0688	0,3903	0,0312
STRAT	PA03	PA05	0,0228	<,0001	0,6037	0,347	0,3496	0,1147	0,1526	0,0002
STRAT	PA04	PA05	0,6491	0,0069	0,6652	0,8554	0,1834	0,8079	0,5672	0,1034
VAR	ICMV IS 89305	Local	0,0788	0,0094	<,0001	<,0001	0,3758	0,0017	<,0001	<,0001
VAR	ICMV IS 89305	ZATIB	0,2962	<,0001	<,0001	<,0001	0,0344	0,1689	0,3851	0,5963
VAR	Local	ZATIB	0,0052	0,005	0,6495	<,0001	0,0028	<,0001	<,0001	<,0001
SITE	Bagoua	Banizoumbou	0,6787	0,0001	0,218	0,4269	<,0001	0,3596	<,0001	0,3255
SITE	Bagoua	Kodey	0,506	<,0001	<,0001	<,0001	<,0001	<,0001	0,237	0,5554
SITE	Banizoumbou	Kodey	0,8018	<,0001	<,0001	<,0001	0,3282	<,0001	<,0001	0,6936

Rdmt paille = rendement en paille, Rdmt grain = rendement en grain, HI = indice de récolte, Pds grains = poids des grains par épi, epis/pkt = nombre d'épis par poquet, talles/pkt = nombre de talles par poquet, taux survie = taux de survie à la récolte, survie dém = taux de survie au démarrage

8. Tableaux de moyennes, analyse de variance et comparaisons multiples sur 3 ans et sur 2004 et 2005

Tableau 8-1. ANOVA (2003-2004-2005).....	8-32
Tableau 8-2. Moyennes et p-valeurs (2003-2004-2005).....	8-33
Tableau 8-3. Comparaison multiples (Bonferroni)(2003-2004-2005).....	8-35
Tableau 8-4. ANOVA (2003-2004-2005)*.....	8-36
Tableau 8-5. Moyennes et p-valeurs (2003-2004-2005)*.....	8-37
Tableau 8-6. Comparaison multiples (Bonferroni)(2003-2004-2005)*.....	8-39

*Les strates FT-1 et FT-2 ont été omises pour que les moyennes entre années possèdent le même effectif

Tableau 8-1. ANOVA (2003-2004-2005)

Type 3 Tests of Fixed Effects									
Effect	Num DF	Rdmt paille Pr > F	Rdt grain Pr > F	HI Pr > F	Pds grains Pr > F	epis/pkt Pr > F	talles/pkt Pr > F	taux survie Pr > F	survie dém Pr > F
AN	2	<,0001	<,0001	<,0001	<,0001	<,0001	<,0001	<,0001	<,0001
SITE	2	<,0001	<,0001	<,0001	<,0001	0,0046	0,6117	<,0001	<,0001
STRAT 2	6	<,0001	<,0001	<,0001	<,0001	<,0001	<,0001	<,0001	<,0001
FERT	2	<,0001	<,0001	0,5251	0,0004	<,0001	<,0001	0,0154	<,0001
VAR	2	<,0001	<,0001	<,0001	<,0001	0,0094	<,0001	<,0001	<,0001
STRAT *FERT	12	0,2841	0,019	0,3063	0,1943	0,0641	0,1319	<,0001	0,7371
STRAT 2*VAR	12	0,4078	0,9825	0,327	0,4502	0,405	0,4247	0,2622	0,0132
FERT *VAR	4	0,4462	0,1805	0,904	0,5407	0,1915	0,7738	0,3706	0,4461
REP	2	,	,	,	,	,	,	,	,
AN *SITE	4	<,0001	<,0001	<,0001	<,0001	<,0001	<,0001	<,0001	<,0001
SITE *STRAT	12	<,0001	<,0001	<,0001	0,0038	0,0417	<,0001	<,0001	<,0001
AN *STRAT 2	9	<,0001	<,0001	<,0001	<,0001	<,0001	<,0001	<,0001	<,0001
AN *FERT	4	0,7854	0,009	0,0006	0,4889	0,0026	0,0761	0,0329	0,2443
AN *VAR	4	<,0001	0,0009	<,0001	0,3716	0,8662	0,9061	0,0003	<,0001
SITE *FERT	4	0,323	0,0007	0,2176	0,367	0,2671	0,2293	<,0001	0,0642
SITE *VAR	4	0,0702	0,2808	0,0273	0,0271	0,0048	0,1498	0,7258	<,0001

Bag = Bagoua, Bani = Banizoumbou, Kod = Kodey, STRAT = strate de fertilité, FERT = fertilisation, VAR = variété

Rdmt paille = rendement en paille, Rdmt grain = rendement en grain, HI = indice de récolte, Pds grains = poids des grains par épi, epis/pkt = nombre d'épis par poquet, talles/pkt = nombre de talles par poquet, taux survie = taux de survie à la récolte, survie dém = taux de survie au démarrage

Tableau 8-2. Moyennes et p-valeurs (2003-2004-2005)

Variable	AN	Mean	SITE	Mean	FERTILISATION	Mean	VARIETE	Mean
Rendement en paille (kg ha ⁻¹)	2003	1891	Bagoua	1415,8	DAP	1348	ICMV IS 893	1269,3
	2004	1261	Banizoumbou	1349,9	DAP + Urée	1413,7	Local	1428,7
	2005	915,2	Kodey	1139,3	Témoin	1142,5	ZATIB	1206,5
	p-valeur	<,0001	p-valeur	<,0001	p-valeur	<,0001	p-valeur	<,0001
Rendement en grain (kg ha ⁻¹)	2003	633,8	Bagoua	632,1	DAP	580	ICMV IS 893	607,9
	2004	677,3	Banizoumbou	608,1	DAP + Urée	597,9	Local	544
	2005	409,2	Kodey	441,9	Témoin	502,9	ZATIB	529,7
	p-valeur	<,0001	p-valeur	<,0001	p-valeur	<,0001	p-valeur	<,0001
Indice de récolte (%)	2003	23,84	Bagoua	28,126	DAP	27,345	ICMV IS 893	29,193
	2004	30,44	Banizoumbou	29,175	DAP + Urée	27,012	Local	25,37
	2005	27,14	Kodey	24,655	Témoin	27,58	ZATIB	27,37
	p-valeur	<,0001	p-valeur	<,0001	p-valeur	n.s.	p-valeur	<,0001
Poids des grains épi ⁻¹ (g)	2003	30,86	Bagoua	31,113	DAP	28,494	ICMV IS 893	27,614
	2004	34,02	Banizoumbou	27,245	DAP + Urée	28,692	Local	30,445
	2005	20,91	Kodey	25,699	Témoin	26,865	ZATIB	26,006
	p-valeur	<,0001	p-valeur	<,0001	p-valeur	0,0004	p-valeur	<,0001
Nombre d'épis poquet ⁻¹	2003	2,85	Bagoua	3,0256	DAP	2,9538	ICMV IS 893	2,9435
	2004	3,083	Banizoumbou	2,7587	DAP + Urée	2,9774	Local	2,9405
	2005	2,744	Kodey	2,8779	Témoin	2,7343	ZATIB	2,783
	p-valeur	<,0001	p-valeur	0,0046	p-valeur	<,0001	p-valeur	0,0094
Nombre de talles poquet ⁻¹	2003	3,205	Bagoua	3,6539	DAP	3,683	ICMV IS 893	3,5163
	2004	3,968	Banizoumbou	3,5861	DAP + Urée	3,742	Local	3,88
	2005	3,532	Kodey	3,5177	Témoin	3,3315	ZATIB	3,3615
	p-valeur	<,0001	p-valeur	n.s.	p-valeur	<,0001	p-valeur	<,0001
Taux de survie à la récolte (%)	2003	80,18	Bagoua	69,565	DAP	71,994	ICMV IS 893	76,042
	2004	64,55	Banizoumbou	75,84	DAP + Urée	72,747	Local	63,12
	2005	71,96	Kodey	65,953	Témoin	68	ZATIB	73,581
	p-valeur	<,0001	p-valeur	<,0001	p-valeur	0,0154	p-valeur	<,0001
Taux de survie au démarrage (%)	2003	82,21	Bagoua	86,37	DAP	85,787	ICMV IS 893	89,959
	2004	84,37	Banizoumbou	92,28	DAP + Urée	86,731	Local	83,912
	2005	94,26	Kodey	84,199	Témoin	90,331	ZATIB	88,979
	p-valeur	<,0001	p-valeur	<,0001	p-valeur	<,0001	p-valeur	<,0001
Nombre de poquets végétatifs	2003	0,637	Bagoua	2,652	DAP	2,095	ICMV IS 893	3,327
	2004	5,109	Banizoumbou	3,706	DAP + Urée	2,204	Local	4,057
	2005	3,885	Kodey	5,037	Témoin	6,717	ZATIB	3,633
Nombre de poquets non mures	2003	0,47	Bagoua	2,393	DAP	2,361	ICMV IS 893	2,898
	2004	4,138	Banizoumbou	2,459	DAP + Urée	2,392	Local	3,329
	2005	2,912	Kodey	4,077	Témoin	3,839	ZATIB	2,365

Variable	STRATE	Mean	Bagoua	Bani	Kodey	Variable	STRATE	Mean	Bagoua	Bani	Kodey
Rendement en paille (kg ha⁻¹)	<i>FT</i>	1405,5	1555,9	1251	1409,8	Nombre de talles poquet⁻¹	<i>FT</i>	3,8541	4,333	3,5259	3,704
	<i>FT-1</i>	1116,6	1186,4	796,8	1366		<i>FT-1</i>	3,6241	3,413	3,885	3,575
	<i>FT-2</i>	792,4	667,7	689,8	1019,6		<i>FT-2</i>	3,495	3,321	3,695	3,469
	<i>NF</i>	700,8	875,8	607,9	616,4		<i>NF</i>	2,8217	2,892	2,8732	2,701
	<i>PA</i>	1957	1974	2624	1272,9		<i>PA</i>	3,8686	3,9	4,029	3,677
	<i>PA-1</i>	1433,3	1624,1	1530	1145,5		<i>PA-1</i>	3,7816	3,979	3,635	3,731
	<i>PA-2</i>	1299,5	1451,3	1307	1140,1		<i>PA-2</i>	3,6018	3,437	3,615	3,753
	p-valeur	<,0001					p-valeur	<,0001			
Rendement en grain (kg ha⁻¹)	<i>FT</i>	587	597,6	644,2	519,4	Taux de survie à la récolte (%)	<i>FT</i>	73,26	65,34	85,72	66,44
	<i>FT-1</i>	546,1	668,2	469	501,1		<i>FT-1</i>	71,45	74,46	72,38	67,51
	<i>FT-2</i>	352,7	360	402,2	295,9		<i>FT-2</i>	71,51	65,75	80,52	68,27
	<i>NF</i>	298,1	390,4	275,7	226,9		<i>NF</i>	60,24	64,5	56,65	59,24
	<i>PA</i>	799,4	883	967,3	547,9		<i>PA</i>	78,67	72,53	87,61	74,46
	<i>PA-1</i>	619,6	687,1	682,3	489,6		<i>PA-1</i>	71,89	69,32	78,14	66,35
	<i>PA-2</i>	571,9	668,8	612	435,2		<i>PA-2</i>	69,88	74,14	71,85	60,56
	p-valeur	<,0001					p-valeur	<,0001			
Indice de récolte (%)	<i>FT</i>	26,657	25,862	30,044	24,064	Taux de survie au démarrage (%)	<i>FT</i>	84,49	73,83	95,011	84,63
	<i>FT-1</i>	29,183	31,514	31,305	24,73		<i>FT-1</i>	93,057	97,062	93,465	88,64
	<i>FT-2</i>	27,633	31,52	31,14	20,24		<i>FT-2</i>	94,092	93,909	94,674	93,69
	<i>NF</i>	25,648	27,266	26,304	23,416		<i>NF</i>	86,872	90,8	86,88	82,94
	<i>PA</i>	27,574	28,397	27,72	26,604		<i>PA</i>	89,719	88,08	95,97	85,1
	<i>PA-1</i>	26,978	26,956	28,76	25,217		<i>PA-1</i>	85,556	81,55	92,705	82,41
	<i>PA-2</i>	28,314	28,761	30,816	25,396		<i>PA-2</i>	85,66	87,95	89,25	79,78
	p-valeur	<,0001					p-valeur	<,0001			
Poids des grains épi⁻¹ (g)	<i>FT</i>	29,329	31,24	27,895	28,85	Nombre de poquets végétatifs	<i>FT</i>	1,292	0,741	1,765	1,407
	<i>FT-1</i>	26,614	30,73	24,825	24,28		<i>FT-1</i>	4,475	4,037	5,8	3,593
	<i>FT-2</i>	20,495	22,39	20,98	18,12		<i>FT-2</i>	4,506	3,148	1,519	8,85
	<i>NF</i>	23,179	26,41	21,631	21,4		<i>NF</i>	8,407	7,56	8,93	8,91
	<i>PA</i>	31,14	35,7	30,253	27,47		<i>PA</i>	1,292	0,988	1,284	1,759
	<i>PA-1</i>	30,004	33,65	29,95	26,41		<i>PA-1</i>	1,282	0,642	1,938	1,259
	<i>PA-2</i>	29,813	31,731	29,88	27,83		<i>PA-2</i>	5,171	2,247	3,951	11,39
	p-valeur	<,0001									
Nombre d'épis poquet⁻¹	<i>FT</i>	2,9623	3,1797	2,7111	3,013	Nombre de poquets non matures	<i>FT</i>	2,032	1,704	1,543	3,259
	<i>FT-1</i>	2,8133	2,9371	2,6191	2,884		<i>FT-1</i>	3,086	2,352	4	2,907
	<i>FT-2</i>	2,4796	2,559	2,4059	2,4734		<i>FT-2</i>	3,654	3,963	0,778	6,222
	<i>NF</i>	2,3062	2,3864	2,0627	2,528		<i>NF</i>	4,477	5,309	3,086	5,315
	<i>PA</i>	3,3274	3,5077	3,39	2,9634		<i>PA</i>	1,449	1,667	0,988	1,815
	<i>PA-1</i>	3,1504	3,303	2,995	3,155		<i>PA-1</i>	2,356	1,136	2,852	3,444
	<i>PA-2</i>	2,8956	2,9661	2,8038	2,926		<i>PA-2</i>	3,542	1,654	3,358	6,648
	p-valeur	<,0001									

Tableau 8-3. Comparaison multiples (Bonferroni)(2003-2004-2005)

Differences of Least Squares Means			Rdmt paille	Rdt grain	HI	Pds grains	epis/pkt	talles/pkt	taux survie	survie dém
Effect			Pr > F	Pr > F	Pr > F	Pr > F	Pr > F	Pr > F	Pr > F	Pr > F
FERT	DAP	DAP + Urée	0,3378	0,4645	0,6452	0,6933	0,8415	0,9966	0,8659	0,2039
FERT	DAP	Témoin	<,0001	<,0001	0,5031	0,0013	0,0003	<,0001	0,0098	<,0001
FERT	DAP + Urée	Témoin	<,0001	<,0001	0,259	0,0003	0,0001	<,0001	0,0158	<,0001
STRAT 2	FT	NF	<,0001	<,0001	0,0685	<,0001	<,0001	<,0001	<,0001	0,0086
STRAT 2	FT	PA	<,0001	<,0001	0,0799	0,006	<,0001	0,8818	<,0001	<,0001
STRAT 2	FT	PA-1	0,6351	0,087	0,5397	0,3051	0,498	0,4566	0,4043	0,2394
STRAT 2	FT	PA-2	0,0691	0,3756	0,0014	0,4646	0,3198	0,0095	0,1412	0,2001
STRAT 2	NF	PA	<,0001	<,0001	0,0004	<,0001	<,0001	<,0001	<,0001	0,0017
STRAT 2	NF	PA-1	<,0001	<,0001	0,0151	<,0001	<,0001	<,0001	<,0001	0,1458
STRAT 2	NF	PA-2	<,0001	<,0001	<,0001	<,0001	<,0001	<,0001	<,0001	0,1771
STRAT 2	PA	PA-1	<,0001	<,0001	0,2549	0,0846	0,0001	0,3718	0,0003	<,0001
STRAT 2	PA	PA-2	<,0001	<,0001	0,1455	0,0439	<,0001	0,0061	<,0001	<,0001
STRAT 2	PA-1	PA-2	0,022	0,0095	0,0096	0,7693	0,0946	0,0643	0,0212	0,9165
VAR	ICMV IS 89305	Local	<,0001	<,0001	<,0001	<,0001	0,9307	<,0001	<,0001	<,0001
VAR	ICMV IS 89305	ZATIB	0,1227	<,0001	<,0001	0,0007	0,0072	0,0493	0,0619	0,2206
VAR	Local	ZATIB	<,0001	0,171	<,0001	<,0001	0,0093	<,0001	<,0001	<,0001
SITE	Bagoua	Banizoumbou	0,3975	0,0195	0,1323	<,0001	0,0011	0,9164	<,0001	<,0001
SITE	Bagoua	Kodey	<,0001	<,0001	<,0001	<,0001	,	0,3647	,	0,022
SITE	Banizoumbou	Kodey	<,0001	<,0001	<,0001	0,0286	,	0,4233	,	<,0001

Rdmt paille = rendement en paille, Rdmt grain = rendement en grain, HI = indice de récolte, Pds grains = poids des grains par épi, epis/pkt = nombre d'épis par poquet, talles/pkt = nombre de talles par poquet, taux survie = taux de survie à la récolte, survie dém = taux de survie au démariage

Tableau 8-4. ANOVA (2003-2004-2005)*

Type 3 Tests of Fixed Effects		Rdmt paille	Rdt grain	HI	Pds grains	epis/pkt	talles/pkt	taux survie	survie dém
Effect	Num DF	Pr > F	Pr > F	Pr > F	Pr > F	Pr > F	Pr > F	Pr > F	Pr > F
AN_DESC	2	<,0001	<,0001	<,0001	<,0001	<,0001	<,0001	<,0001	<,0001
SITE_DESC	2	<,0001	<,0001	<,0001	<,0001	<,0001	0,0221	<,0001	<,0001
STRAT_DESC2	4	<,0001	<,0001	<,0001	<,0001	<,0001	<,0001	<,0001	<,0001
FERT_DESC	2	<,0001	<,0001	0,6261	0,0007	<,0001	<,0001	0,0045	<,0001
VAR_DESC	2	<,0001	<,0001	<,0001	<,0001	0,0026	<,0001	<,0001	<,0001
STRAT_DESC*FERT_DESC	8	0,1724	0,0075	0,1818	0,0696	0,0633	0,0787	<,0001	0,5038
STRAT_DESC2*VAR_DESC	8	0,4043	0,9063	0,3979	0,7375	0,3617	0,2644	0,153	0,0063
FERT_DESC*VAR_DESC	4	0,2859	0,1204	0,7416	0,6754	0,109	0,7156	0,3171	0,4201
REP	2	,	,	,	,	,	,	,	,
AN_DESC*SITE_DESC	4	<,0001	<,0001	<,0001	<,0001	<,0001	<,0001	<,0001	<,0001
SITE_DESC*STRAT_DESC	8	<,0001	<,0001	0,0001	0,006	0,0794	0,0003	<,0001	<,0001
AN_DESC*STRAT_DESC2	8	<,0001	<,0001	<,0001	<,0001	<,0001	<,0001	<,0001	<,0001
AN_DESC*FERT_DESC	4	0,7115	0,0076	0,0237	0,3664	0,0008	0,1613	0,0332	0,2671
AN_DESC*VAR_DESC	4	<,0001	0,0003	<,0001	0,3611	0,6714	0,9655	0,0014	<,0001
SITE_DESC*FERT_DESC	4	0,6645	0,0228	0,5283	0,5723	0,3955	0,2482	<,0001	0,131
SITE_DESC*VAR_DESC	4	0,0608	0,4975	0,0264	0,0226	0,0805	0,0888	0,933	<,0001

* Les strates FT-1 et FT-2 ont été omises pour que les moyennes entre années possèdent le même effectif

Bag = Bagoua, Bani = Banizoumbou, Kod = Kodey, STRAT = strate de fertilité, FERT = fertilisation, VAR = variété

Rdmt paille = rendement en paille, Rdmt grain = rendement en grain, HI = indice de récolte, Pds grains = poids des grains par épi, epis/pkt = nombre d'épis par poquet, talles/pkt = nombre de talles par poquet, taux survie = taux de survie à la récolte, survie dém = taux de survie au démariage

Tableau 8-5. Moyennes et p-valeurs (2003-2004-2005)*

Variable	AN	Mean	SITE	Mean	FERTILISATION	Mean	VARIETE	Mean
Rendement en paille (kg ha ⁻¹)	2003	1891,4	Bagoua	1496,3	DAP	1406,6	ICMV IS 893	1324,2
	2004	1232,2	Banizoumbou	1468,2	DAP + Urée	1477,6	Local	1485,1
	2005	956,7	Kodey	1116,9	Témoin	1195,9	ZATIB	1271,3
	p-valeur	<,0001	p-valeur	<,0001	p-valeur	<,0001	p-valeur	<,0001
Rendement en grain (kg ha ⁻¹)	2003	633,8	Bagoua	645,4	DAP	594,7	ICMV IS 893	624,5
	2004	673,5	Banizoumbou	640,9	DAP + Urée	617,5	Local	558,7
	2005	423,22	Kodey	443,8	Témoin	516	ZATIB	545,9
	p-valeur	<,0001	p-valeur	<,0001	p-valeur	<,0001	p-valeur	<,0001
Indice de récolte (%)	2003	23,841	Bagoua	27,448	DAP	27,149	ICMV IS 893	28,94
	2004	30,484	Banizoumbou	28,754	DAP + Urée	26,83	Local	25,181
	2005	26,842	Kodey	24,939	Témoin	27,139	ZATIB	26,995
	p-valeur	<,0001	p-valeur	<,0001	p-valeur	n.s.	p-valeur	<,0001
Poids des grains épi ¹ (g)	2003	30,862	Bagoua	31,745	DAP	29,177	ICMV IS 893	28,13
	2004	34,386	Banizoumbou	27,996	DAP + Urée	29,332	Local	31,078
	2005	20,98	Kodey	26,393	Témoin	27,619	ZATIB	26,936
	p-valeur	<,0001	p-valeur	<,0001	p-valeur	0,0007	p-valeur	<,0001
Nombre d'épis poquet ¹	2003	2,8499	Bagoua	3,0685	DAP	3,0074	ICMV IS 893	3,011
	2004	3,0955	Banizoumbou	2,8015	DAP + Urée	3,0373	Local	2,9676
	2005	2,8238	Kodey	2,9172	Témoin	2,7469	ZATIB	2,8154
	p-valeur	<,0001	p-valeur	<,0001	p-valeur	<,0001	p-valeur	<,0001
Nombre de talles poquet ¹	2003	3,2046	Bagoua	3,7082	DAP	3,6643	ICMV IS 893	3,5153
	2004	4,014	Banizoumbou	3,5387	DAP + Urée	3,7554	Local	3,8895
	2005	3,544	Kodey	3,5133	Témoin	3,3396	ZATIB	3,3559
	p-valeur	<,0001	p-valeur	0,0221	p-valeur	<,0001	p-valeur	n.s.
Taux de survie à la récolte (%)	2003	80,18	Bagoua	69,166	DAP	71,53	ICMV IS 893	75,68
	2004	63,01	Banizoumbou	75,99	DAP + Urée	72,8	Local	63,63
	2005	72,306	Kodey	65,41	Témoin	68,04	ZATIB	73,05
	p-valeur	<,0001	p-valeur	<,0001	p-valeur	0,0045	p-valeur	<,0001
Taux de survie au démarrage (%)	2003	82,212	Bagoua	84,442	DAP	84,522	ICMV IS 893	89,083
	2004	82,559	Banizoumbou	91,962	DAP + Urée	85,677	Local	82,479
	2005	94,607	Kodey	82,973	Témoin	89,179	ZATIB	87,816
	p-valeur	<,0001	p-valeur	<,0001	p-valeur	<,0001	p-valeur	<,0001
Nombre de poquets végétatifs	2003	0,637	Bagoua	2,435	DAP	1,886	ICMV IS 893	3,136
	2004	4,975	Banizoumbou	3,573	DAP + Urée	1,975	Local	3,969
	2005	3,904	Kodey	4,944	Témoin	6,606	ZATIB	3,361
	p-valeur	<,0001	p-valeur	<,0001	p-valeur	<,0001	p-valeur	<,0001
Nombre de poquets non matures	2003	0,4704	Bagoua	2,294	DAP	2,333	ICMV IS 893	2,9
	2004	4,281	Banizoumbou	2,365	DAP + Urée	2,272	Local	3,183
	2005	2,795	Kodey	4,096	Témoin	3,708	ZATIB	2,231
	p-valeur	<,0001	p-valeur	<,0001	p-valeur	<,0001	p-valeur	<,0001

Moyennes et p-valeurs (2003-2004-2005)* (suite du Tableau 8-5)

Variable	STRATE	Mean	Variable	STRATE	Mean
Rendement en paille (kg ha ⁻¹)	FT	1405,5	Nombre de talles poquet ¹	FT	3,8541
	NF	700,8		NF	2,8217
	PA	1957		PA	3,8686
	PA-1	1433,3		PA-1	3,7816
	PA-2	1299,5		PA-2	3,6018
	p-valeur	<,0001		p-valeur	<,0001
Rendement en grain (kg ha ⁻¹)	FT	587	Taux de survie à la récolte (%)	FT	73,26
	NF	298,1		NF	60,24
	PA	799,4		PA	78,67
	PA-1	619,6		PA-1	71,89
	PA-2	571,9		PA-2	69,88
	p-valeur	<,0001		p-valeur	<,0001
Indice de récolte (%)	FT	26,657	Taux de survie au démariage (%)	FT	84,49
	NF	25,648		NF	86,872
	PA	27,574		PA	89,719
	PA-1	26,978		PA-1	85,556
	PA-2	28,314		PA-2	85,66
	p-valeur	<,0001		p-valeur	<,0001
Poids des grains épi ¹ (g)	FT	29,329	Nombre de poquets végétatifs	FT	1,292
	NF	23,179		NF	8,407
	PA	31,14		PA	1,292
	PA-1	30,004		PA-1	1,282
	PA-2	29,813		PA-2	5,171
	p-valeur	<,0001			
Nombre d'épis poquet ¹	FT	2,9623	Nombre de poquets non mures	FT	2,032
	NF	2,3062		NF	4,477
	PA	3,3274		PA	1,449
	PA-1	3,1504		PA-1	2,356
	PA-2	2,8956		PA-2	3,542
	p-valeur	<,0001			

*Les strates FT-1 et FT-2 ont été omises pour que les moyennes entre années possèdent le même effectif

Tableau 8-6. Comparaison multiples (Bonferroni)(2003-2004-2005)*

Differences of Least Squares Means			Rdmt paille	Rdt grain	HI	Pds grains	epis/pkt	talles/pkt	taux survie	survie dém	
Effect			Pr > F	Pr > F	Pr > F	Pr > F	Pr > F	Pr > F	Pr > F	Pr > F	
FERT_DESC	DAP	DAP + Urée	0,1352	0,132	0,4181	0,7686	0,5822	0,2387	0,3964	0,1216	
FERT_DESC	DAP	Témoin	<,0001	<,0001	0,955	0,0016	0,0001	<,0001	0,0197	<,0001	
FERT_DESC	DAP + Urée	Témoin	<,0001	<,0001	0,3885	0,0006	<,0001	<,0001	0,0015	<,0001	
STRAT_DESC2	FT	NF	<,0001	<,0001	0,0634	<,0001	<,0001	<,0001	<,0001	0,0135	
STRAT_DESC2	FT	PA	<,0001	<,0001	0,0711	0,0079	<,0001	0,8847	<,0001	<,0001	
STRAT_DESC2	FT	PA-1	0,6511	0,0954	0,5273	0,3212	0,5172	0,4679	0,4044	0,269	
STRAT_DESC2	FT	PA-2	0,0835	0,3897	0,001	0,4806	0,3423	0,0116	0,1408	0,2285	
STRAT_DESC2	NF	PA	<,0001	<,0001	0,0003	<,0001	<,0001	<,0001	<,0001	0,0032	
STRAT_DESC2	NF	PA-1	<,0001	<,0001	0,013	<,0001	<,0001	<,0001	<,0001	0,1718	
STRAT_DESC2	NF	PA-2	<,0001	<,0001	<,0001	<,0001	<,0001	<,0001	<,0001	0,2049	
STRAT_DESC2	PA	PA-1	<,0001	<,0001	0,2406	0,0953	0,0002	0,3838	0,0003	<,0001	
STRAT_DESC2	PA	PA-2	<,0001	<,0001	0,1345	0,051	<,0001	0,0076	<,0001	<,0001	
STRAT_DESC2	PA-1	PA-2	0,0291	0,0116	0,0077	0,7751	0,1104	0,0716	0,0212	0,9212	
VAR_DESC	ICMV IS 89305	Local	0,0005	<,0001	<,0001	<,0001	0,497	<,0001	<,0001	<,0001	
VAR_DESC	ICMV IS 89305	ZATIB	0,2643	<,0001	<,0001	0,0248	0,0011	0,0374	0,0454	0,0884	
VAR_DESC	Local	ZATIB	<,0001	0,3846	<,0001	<,0001	0,0094	<,0001	<,0001	<,0001	
AN_DESC		2003	2004	<,0001	0,052	<,0001	<,0001	,	<,0001	,	0,6418
AN_DESC		2003	2005	<,0001	<,0001	<,0001	<,0001	,	<,0001	,	<,0001
AN_DESC		2004	2005	<,0001	<,0001	<,0001	<,0001	<,0001	<,0001	<,0001	<,0001
SITE_DESC	Bagoua	Banizoumbou	0,4327	0,3551	0,0009	<,0001	<,0001	0,0252	<,0001	<,0001	
SITE_DESC	Bagoua	Kodey	<,0001	<,0001	<,0001	<,0001	,	0,0118	,	0,0484	
SITE_DESC	Banizoumbou	Kodey	<,0001	<,0001	<,0001	0,0053	,	0,7823	,	<,0001	

* Les strates FT-1 et FT-2 ont été omises pour que les moyennes entre années possèdent le même effectif

Rdmt paille = rendement en paille, Rdmt grain = rendement en grain, HI = indice de récolte, Pds grains = poids des grains par épi, epis/pkt = nombre d'épis par poquet, talles/pkt = nombre de talles par poquet, taux survie = taux de survie à la récolte, survie dém = taux de survie au démariage

9. Comparaison visuelle de parcelles en 2005

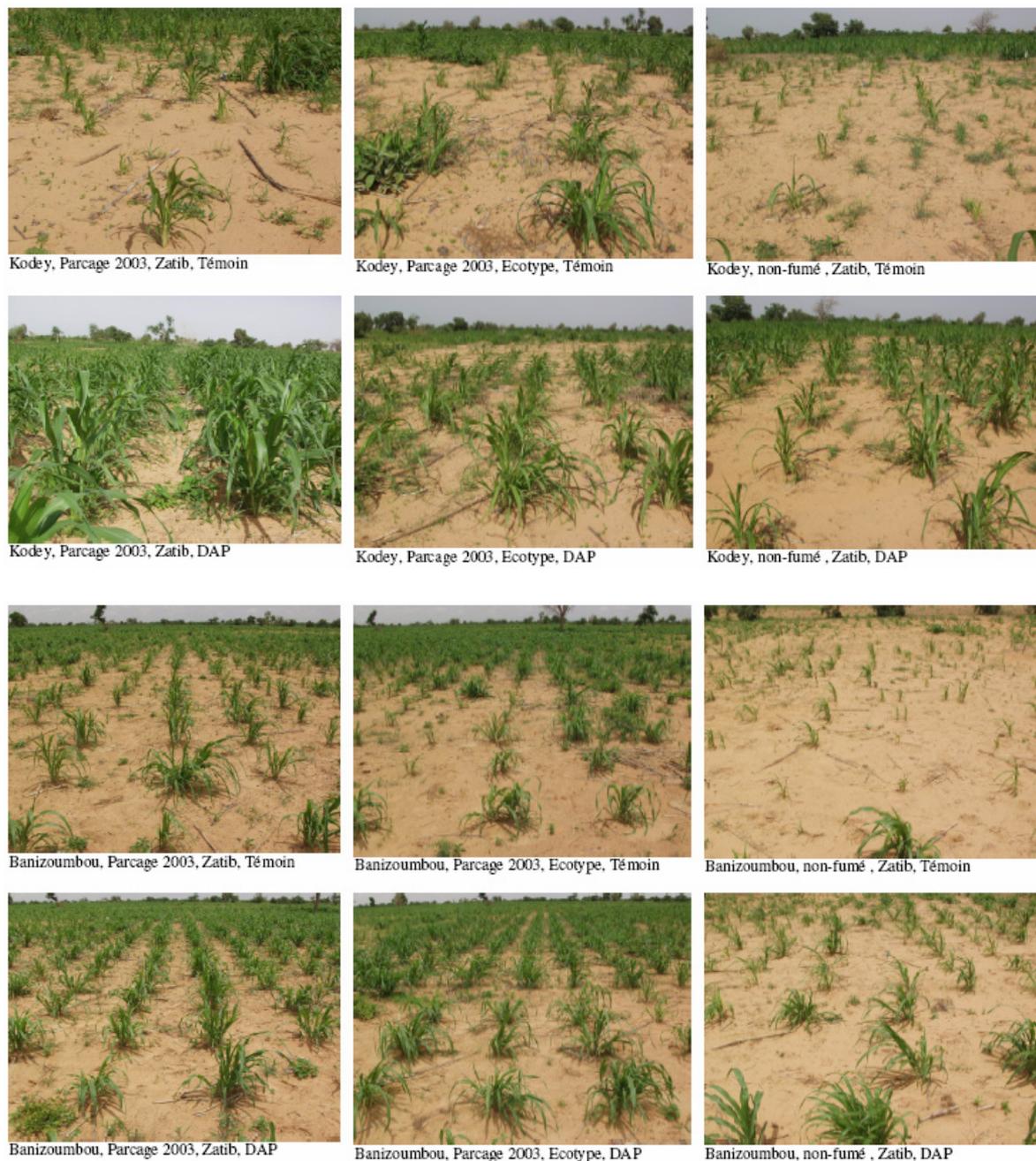


Figure 9-1. Photos des parcelles d'essai le 13 juillet 2005 (source : B. Gérard)
 Les légendes indiquent le nom du champ, la strate de fumure organique (PA03 ou NF), la variété (Ecotype = locale ou Zatib) et le niveau de fertilisation minérale (DAP ou témoin)

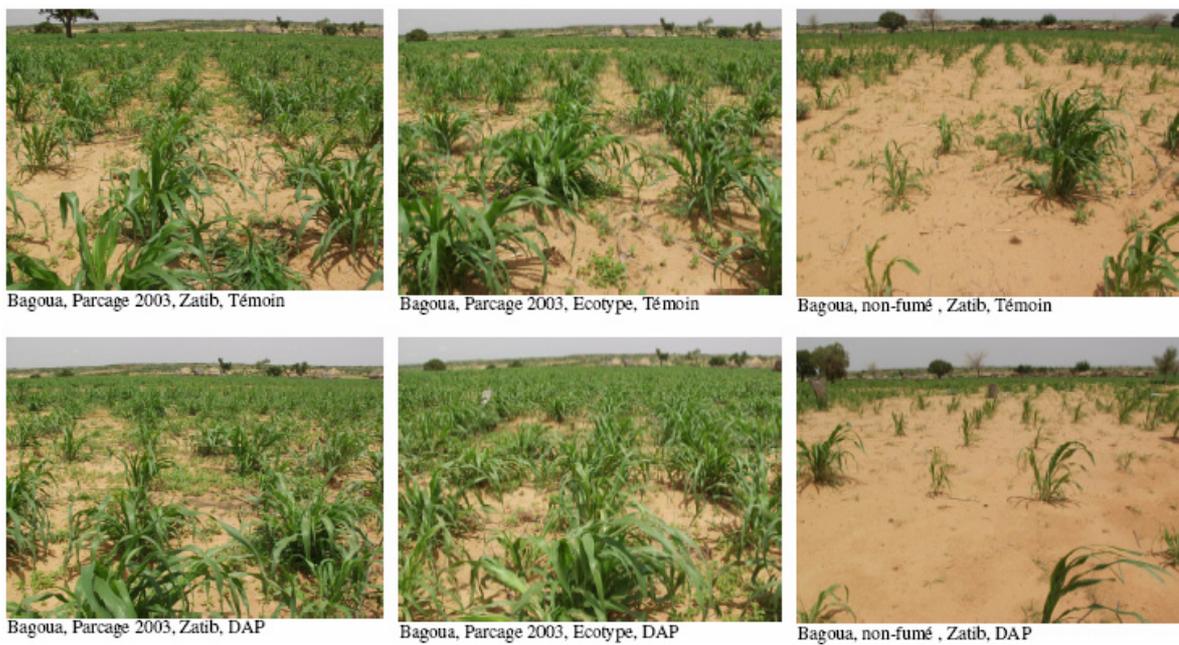


Figure 9-2. Photos des parcelles d'essai en 2003 (suite)
Les légendes indiquent le nom du champ, la strate de fumure organique (PA03 ou NF), la variété (Ecotype = locale ou Zatib) et le niveau de fertilisation minérale (DAP ou témoin)

10. Evolution de la phénologie du mil en 2005

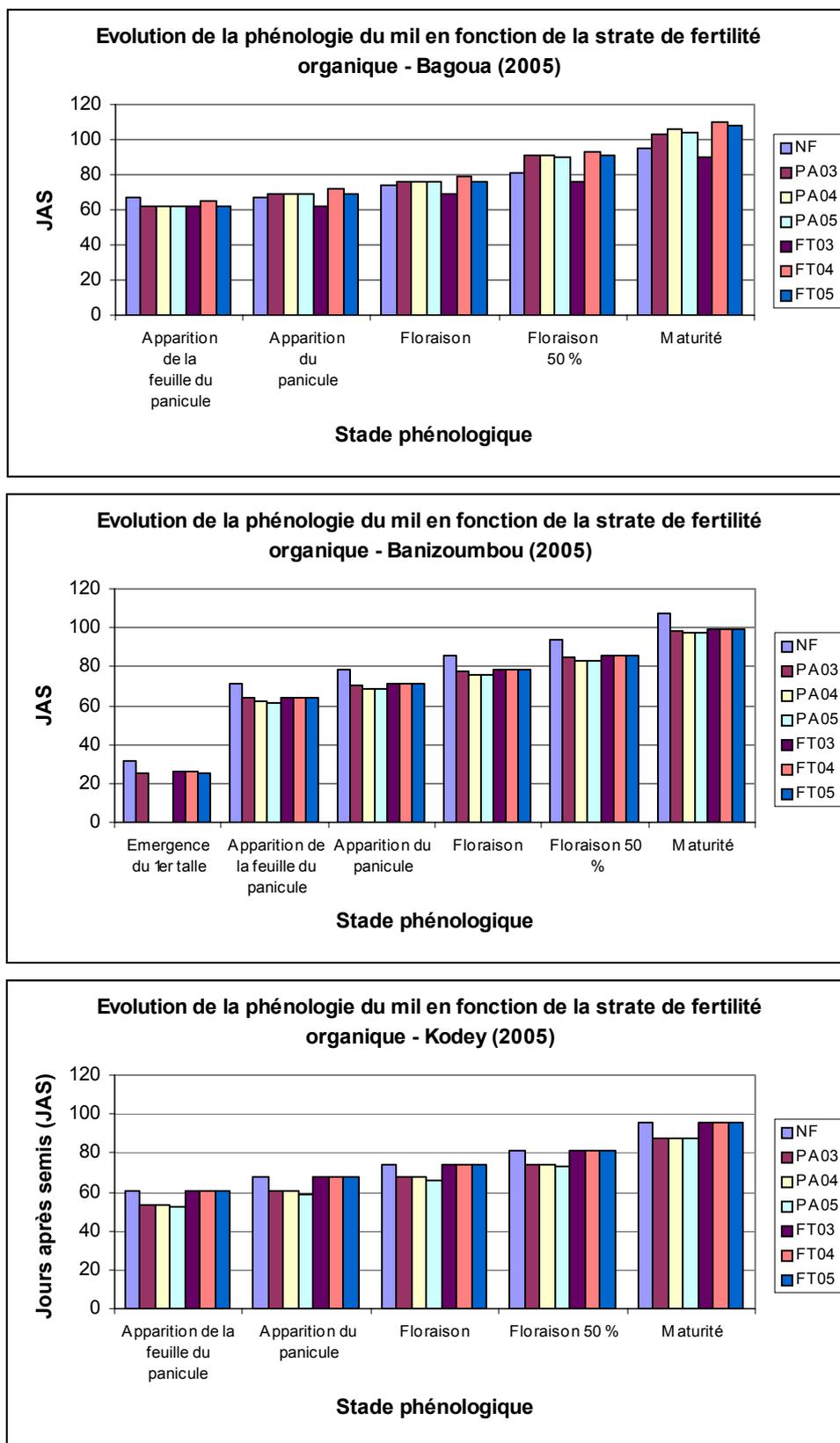


Figure 10-1. Evolution de la phénologie de la tige principale du mil au cours de la saison 2005 en fonction des strates de fertilité à Bagoua, Banizoumbou et Kodey

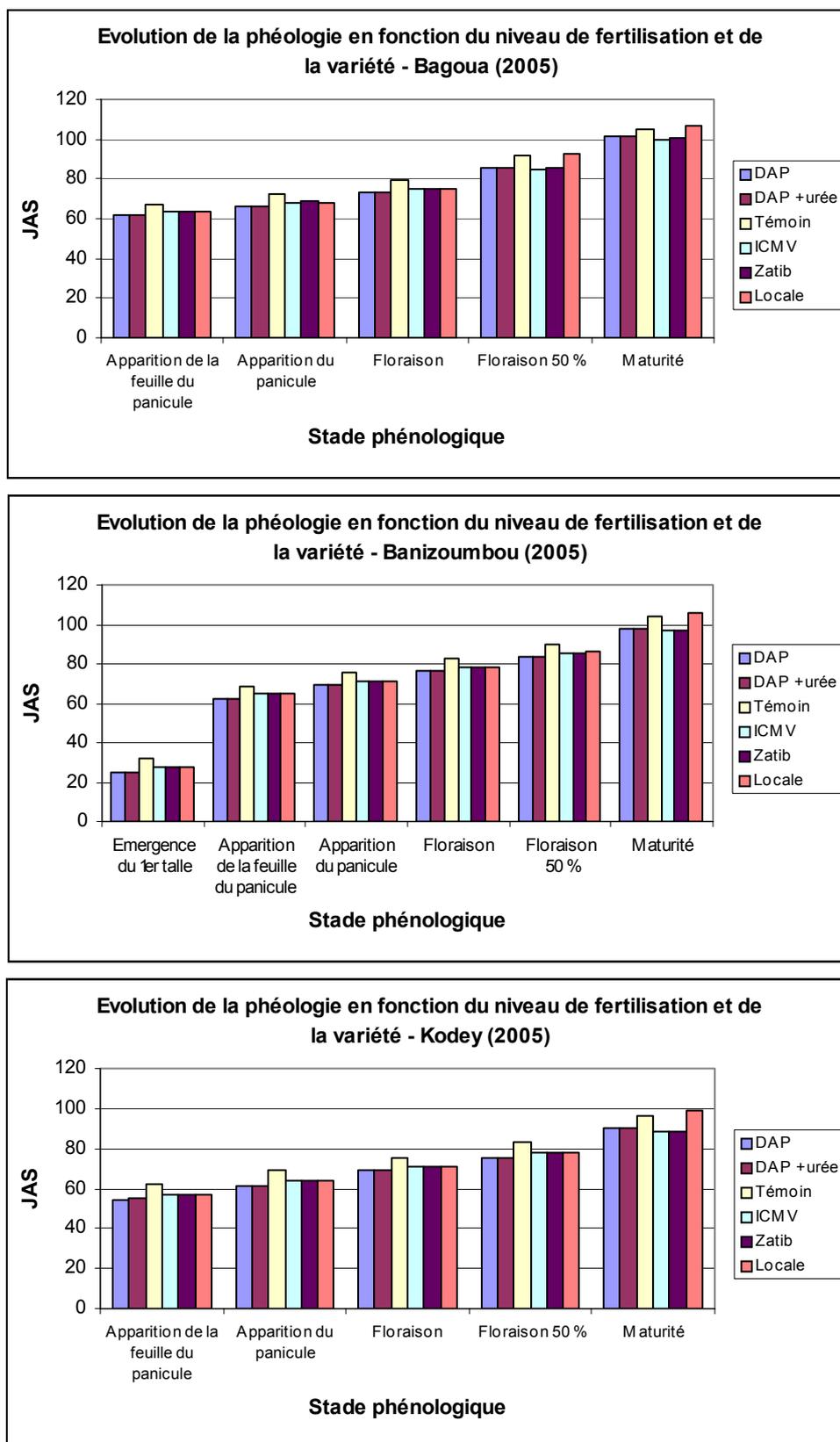


Figure 10-2. Evolution de la phéologie de la tige principale du mil au cours de la saison 2005 en fonction du niveau de fertilisation et de la variété à Bagoua, Banizoumbou et Kodey

11. Caractéristiques phytosanitaires moyennes des parcelles en 2003, 2004 et 2005

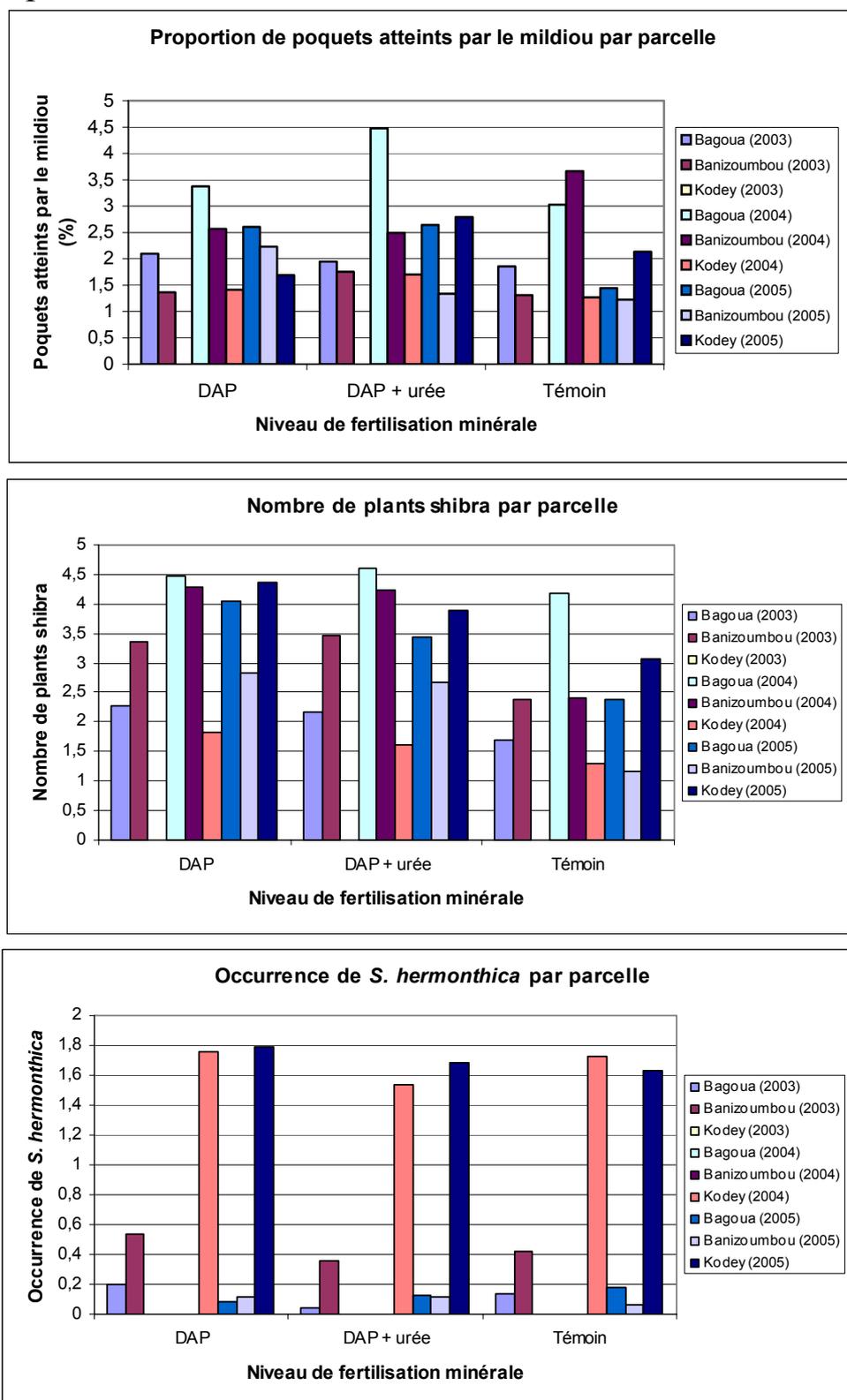


Figure 11-1. Proportion de poquets atteints par le mildiou, nombre de plants shibra et occurrence de *S. hermonthica* par parcelle en fonction du niveau de fertilisation minérale

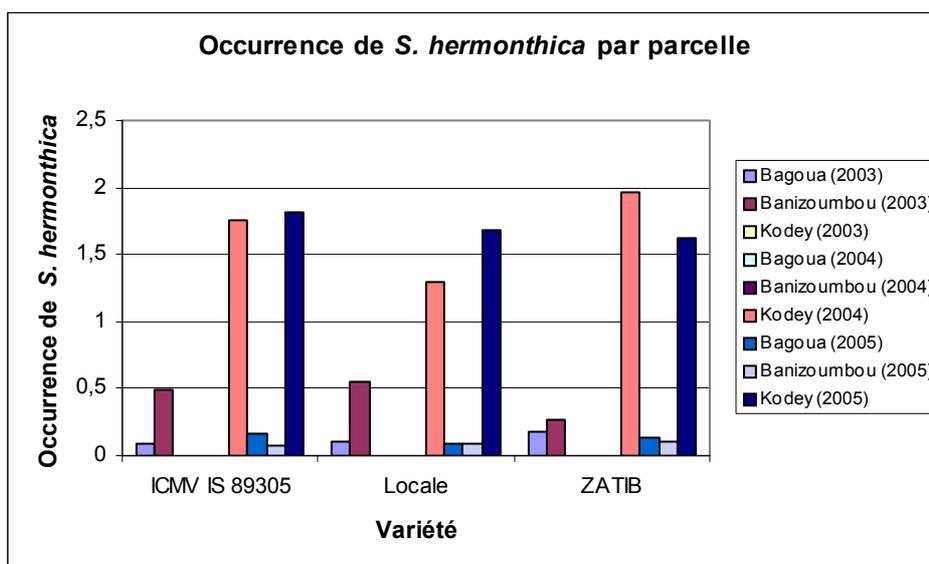
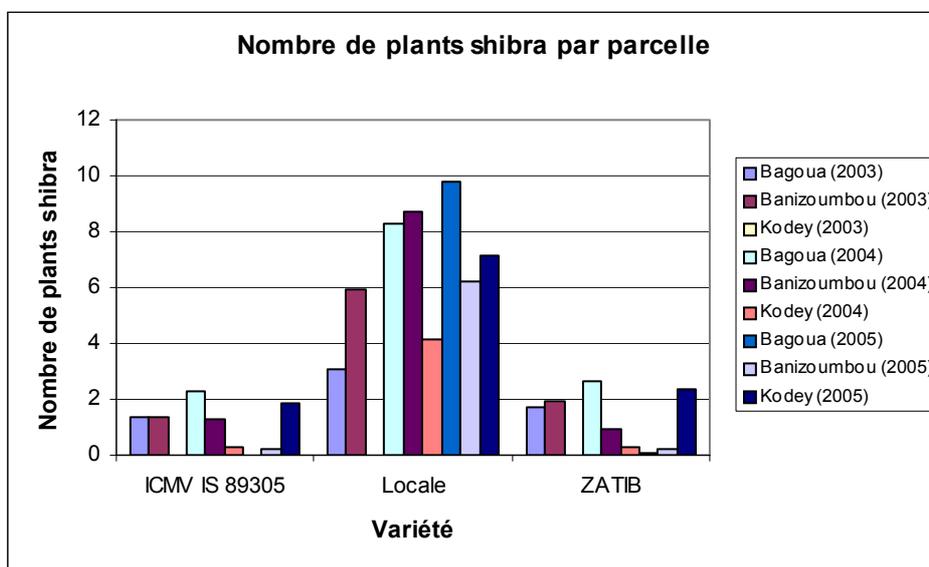
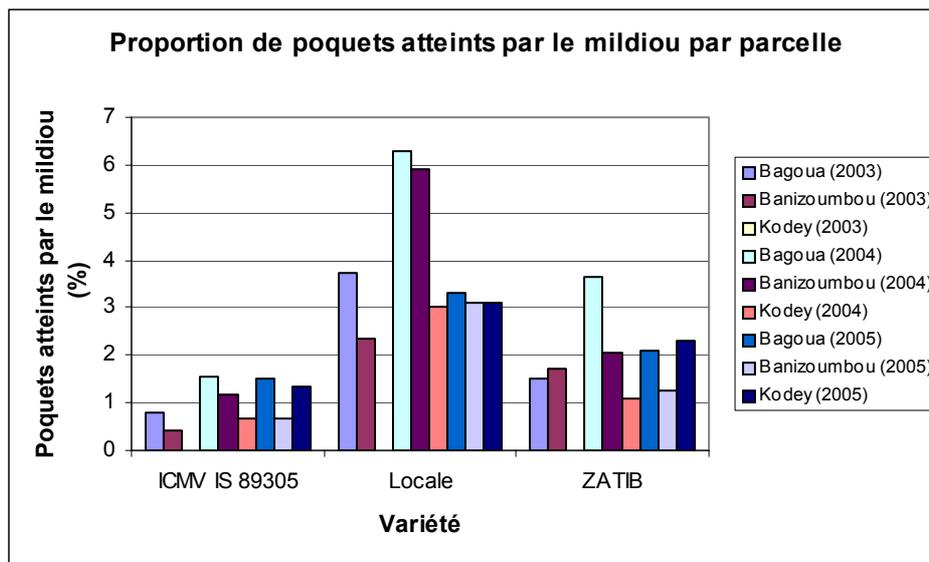


Figure 11-2. Proportion de poquets atteints par le mildiou, nombre de plants shibra et occurrence de *S. hermonthica* par parcelle en fonction de la variété du mil

