

TABLE DES MATIERES

INTRODUCTION	1
CHAPITRE I : REVUE BIBLIOGRAPHIQUE	3
I.1 Systématique	3
I.2 Origine.....	3
I.3 Utilité du maïs.....	3
I.4 Le maïs au Sénégal	4
I.5 Pratiques paysannes	6
I.6 Itinéraires techniques proposés par la recherche	6
I.7 Cycle du maïs	7
I.7.1 La germination	7
I.7.2 La levée.....	8
I.7.3 La formation des organes végétatifs	8
I.7.4 La formation des organes reproducteurs	10
I.7.5 La floraison et la fécondation.....	11
I.7.6 Le remplissage et la maturation des grains	12
I.8 La phénologie du maïs.....	12
I.9 Influences des facteurs et des conditions du milieu	12
I.9.1 Stress hydrique.....	12
I.9.2 Fertilité des sols	13
I.9.3 Température	14
I.9.4 La lumière	14
I.9.5 Facteurs biotiques	14
I.10 L'élaboration du rendement	15
I.10.1 Les composantes du rendement	15
I.10.2 Relations entre composantes	16
I.11 Variabilité des rendements.....	17
CHAPITRE II : MATERIEL ET METHODES	18
II.1 Caractéristiques agro-écologiques de la région d'étude	18
II.1.1 Localisation géographique	18
II.1.2 Caractéristiques climatiques générales.....	18
II.1.3 Caractéristiques climatiques de l'hivernage 2006.....	18
II.1.4 Les sols	23
II.1.5 La végétation.....	23
II.2 Suivis - enquêtes des parcelles.....	23
II.2.1 Présentation.....	23
II.2.2 Echantillonnage : choix des villages	24
II.2.3 Echantillonnage : choix des parcelles	24
II.2.4 Echantillonnage : origines des paysans	27
II.2.5 Contenu de l'enquête	28
II.2.6 Mesures des rendements	29

II.2.7	Relevés au GPS des champs	30
II.2.8	Bilans hydriques des parcelles	30
II.2.9	Analyse des données	32
CHAPITRE III : RESULTATS.....		33
III.1	ETUDE DES SYSTEMES DE CULTURE.....	33
III.1.1	Destination du maïs.....	33
III.1.2	Variétés	33
III.1.3	Gestion de la fertilité	35
III.1.4	Préparation du sol.....	39
III.1.5	Semis : densités, modalités et périodes	39
III.1.6	Gestion de l'enherbement.....	41
III.1.7	Associations culturales.....	42
III.1.8	Corrélations entre type de champs et aspects de la gestion	42
III.2	ETUDES DES RENDEMENTS.....	46
III.2.1	Variabilité des rendements	46
III.2.2	Composantes des rendements.....	48
III.2.3	Rendements en relation à la gestion de la fertilité.....	50
III.2.4	Rendements en relation au type de champs.....	53
III.2.5	Rendements en relation aux bilans hydriques estimés	53
III.2.6	Rendements moyens en relation aux indicateurs hydriques	56
DISCUSSION		58
CONCLUSION		63
BIBLIOGRAPHIE		64
ANNEXES		I

LISTE DES FIGURES

Figure 1: Zone de culture du maïs et cumuls pluviométriques moyens (1950-1997) au Sénégal	4
Figure 2: Coupe d'une graine de maïs	8
Figure 3 : Une plante de maïs au stade « levée »	8
Figure 4 : Morphologie d'un pied de maïs.....	9
Figure 5 : Inflorescence mâle	10
Figure 6 : Coupe de l'ovaire.....	11
Figure 7 : Schéma d'élaboration du maïs.....	16
Figure 8 : Pluviométries annuelles de la station de la météo de Tambacounda.....	19
Figure 9: Répartition de la pluviométrie décadaire de la campagne agricole 2006 : de la station météo et des villages suivis	20
Figure 10: Cumul pluviométrique des villages suivis et la station météo de la campagne agricole 2006	21
Figure 11 : Evolution des paramètres climatiques de la campagne agricole 2006	22
Figure 12 : Position et dimension des placettes de rendement.....	29
Figure 13 : Evolutions des coefficients culturaux (Kc) : cas des cycles de 80, 90, 100, 110, 120 et 130 jours	31
Figure 14: Proportion moyenne des différentes variétés par type de champ et par village	33
Figure 15 : Dates de semis en relation aux variétés dans les villages.....	34
Figure 16 : Longueurs observées des cycles selon les variétés (a) et longueurs des cycles en relation aux dates de semis (b)	35
Figure 17: Proportion moyenne des différents types de rotation de culture par type de champ et par village	36
Figure 18: Proportion moyenne du précédent cultural direct par village et par type de champ	37
Figure 19: Proportion moyenne des différents types de fertilisation par type de champ et par village	38
Figure 20: Proportion moyenne des différents types de travail du sol par type de champ et par village	40
Figure 21: Fréquence des différentes dates de semis exprimées en jours calendaires.....	40
Figure 22 : Proportion moyenne d'utilisation d'herbicide par type de champ et par village..	41
Figure 23: Proportion moyenne des différents types d'associations culturales par type de champ et par village	42
Figure 24 : Corrélations entre deux types de champs et les variables de gestion de la fertilité, précédent et rotation	44
Figure 25 : Corrélations entre les deux types de champs et aspects de la gestion et du sol....	45
Figure 26 : Variabilité des rendements : (a) indicateurs statistiques par village ; (b) rendements des parcelles rangés par ordre croissant dans chaque village	46
Figure 27 : Variabilité intra-parcellaire des rendements obtenus à Birataba	47
Figure 28 : Corrélations entre le rendement avec la densité (a), le nombre d'épis par pied (NEpis/Pied) (b), le poids des grains par épis (c) et le poids des grains par pied (d) à Fougoulou.....	49
Figure 29 : Corrélations entre le poids des grains par pied avec la densité (a) et le nombre d'épis par pied (Nbre épis/pied) (b) à Fougoulou	50
Figure 30 : Rendements mesurés en relation à l'IRESP et rendements potentiels estimés à partir de l'IRESP	54

Figure 31 : Rendements, nombres d'épis par pied et poids de grains par épis en relation aux indicateurs de satisfaction des besoins hydriques 55

Figure 32 : Rendements villageois et caractéristiques statistiques des rendements villageois en relation aux valeurs moyennes (a) des pluies sur le cycle ; (b) des valeurs moyennes de satisfaction des besoins en eau sur le cycle (ET%cycle) ; (c) des IRESP ; (d) des valeurs moyennes de satisfaction des besoins en eau sur la période floraison (ET%Flor) 57

LISTE DES TABLEAUX

Tableau I : Caractéristiques générales des écosystèmes de culture du maïs au Sénégal..... 5

Tableau II: Variabilité des rendements de maïs des 5 dernières années au Sénégal..... 17

Tableau III : Coordonnées géographiques des villages..... 24

Tableau IV : Nombres et types de parcelles en fonction des villages enquêtés. 27

Tableau V : Répartition des ethnies d'agriculteurs de notre échantillon par village 27

Tableau VI : Paramètres statistiques à l'échelle des villages des données de rendements..... 46

Tableau VII : Variabilité de production selon la variété 47

Tableau VIII : valeurs des R^2 des corrélations entre variables de rendement. Les R^2 donnés en gras indiquent que la corrélation est négative. 49

Tableau IX : Impacts du parcage sur les rendements et leurs composantes : valeurs statistiques et probabilités de différences significatives. 51

Tableau X : Impacts de l'apport d'engrais sur les rendements et leurs composantes : valeurs statistiques et probabilités de différences significatives. 52

Tableau XI : Rendement et ses composantes en relation avec matière organique ou sans matière organique..... 52

Tableau XII : Rendement et ses composantes en relation avec la fertilisation ou sans fertilisation 52

Tableau XIII : Rendement et ses composantes en relation aux types de champs. 53

LISTE DES PHOTOGRAPHIES

Photo 1 : Pluviomètre installé dans un village.....26

Photo 2 : Charrue légère.....26

Photo 3 : Sarcleuse type houe asine.....26

PRINCIPALES ABREVIATIONS UTILISEES

AMMA	Analyse Multidisciplinaire de la Mousson Africaine (projet AMMA)
ANCAR	Agence Nationale de Conseil Agricole et Rural
ANSD	Agence Nationale de la Statistique et de la Démographie
CERAAS	Centre d'Etudes Régionales pour l'Amélioration de l'Adaptation à la Sécheresse
CIRAD	Centre de Coopération Internationale en Recherche Agronomique pour le Développement
DAPS	Direction de l'Analyse et de la Prévision Statistique
ENSA	Ecole Nationale Supérieure d'Agriculture
ET	Evapotranspiration réelle (consommation réelle culture)
ETM	Evapotranspiration maximale (besoins en eau)
ETo	Evapotranspiration potentielle (référence climatique)
FAO	Food and Agriculture Organization
GPS	Global Positioning System
INA P-G	Institut National Agronomique Paris-Grignon
ISRA	Institut Sénégalais de Recherches Agricoles
Kc	Coefficient cultural (d'évapotranspiration)
LERG	Laboratoire d'Enseignement et de Recherche en Géomatique
MAE	Ministère de l'Agriculture et de l'Elevage
MDRA	Ministère du Développement Rural et de l'Agriculture
NPK	Azote (N), Phosphore (P), Potassium (K)
RUR	Réserve Utile Racinaire
SODAGRI	Société de Développement Agricole et Industriel du Sénégal
SODEFITEX	Société de Développement des Fibres Textiles
SSDR	Service Départemental du Développement Rural
UCAD	Université Cheikh Anta Diop (Dakar)
UFR SADR	Unité de Formation et de Recherche des Sciences Agronomiques et du Développement Rural
USAID	United States Agency for International Development

INTRODUCTION

Le maïs (*Zea mays* L) est cultivé sur plus de 140 millions d'hectares (FAO, 1999, cité par Paliwal, 2002a) avec une production annuelle d'environ 600 millions de tonnes. Il est cultivé jusqu'à une latitude nord de 58° au Canada et en Russie, et jusqu'à une latitude sud de 40° en Argentine et au Chili (Paliwal, 2002a). La majorité du maïs est cultivé à moyenne latitude. Il reste une grande céréale alimentaire traditionnelle pour les hommes des régions tropicales. Le maïs a été introduit en Afrique vers le XVIème siècle par les explorateurs portugais.

Au Sénégal, il est cultivé dans quatre zones : le Sénégal oriental, la Casamance, le sud du Sine-Saloum et la vallée du fleuve Sénégal. Le développement de sa culture dans ces zones est lié au fait que le maïs figure dans l'alimentation. La production nationale de maïs reste très insuffisante par rapport à la demande. Les paysans sénégalais n'assurent qu'un peu plus de 50% des besoins céréaliers de la population (Faye, 2001).

Ce travail s'est inscrit dans le cadre de recherches menées au Sénégal, et en Afrique de l'Ouest, pour améliorer les outils de prévision agricole. Ces recherches sont une composante des actions du projet européen Analyse Multidisciplinaire de la Mousson Africaine (AMMA). L'objectif opérationnel est de pouvoir déterminer les productions des petites zones (terroirs villageois) situées autour des postes pluviométriques (« un pluviomètre - un village - une production »), l'extrapolation à des échelles plus grandes (département, région) se faisant ensuite grâce au « vecteur pluie ». On cherche donc en priorité à caler et valider, et améliorer si nécessaire, des modèles de simulation du développement des cultures, pour qu'ils puissent permettre d'estimer les productions agricoles des petites régions en fonction des conditions agrométéorologiques de l'hivernage. Pour y arriver la principale difficulté est tout d'abord d'être en mesure de déterminer ce qu'est la production d'un terroir villageois. Pour cela il faut, d'une part capter la variabilité des rendements et en tirer des indicateurs statistiques pertinents (moyenne, maximum, etc.), d'autre part déterminer les superficies emblavées. De plus les études menées cherchent également à valider les modèles pour des conditions de culture particulières, de façon à pouvoir faire de la prévision spécifiquement pour ces systèmes, et également développer des outils de diagnostic.

Par rapport aux problématiques décrites ce travail poursuivait les objectifs suivants :

- (i) caractérisation de la variabilité des rendements paysans en maïs et des indicateurs moyens ;
- (ii) compréhension des niveaux de rendement, c'est-à-dire compréhension et caractérisation de leurs conditions d'élaboration.

Il a été rendu possible grâce à la collaboration et aux efforts du CERAAS, du CIRAD, et du LERG, dans le cadre du projet européen AMMA.

Pour atteindre ces objectifs, une enquête agronomique a été mise en place dans cinq villages du département de Tambacounda afin de déterminer quels étaient les niveaux des rendements paysans en maïs et leurs variabilités, et quels facteurs agronomiques en étaient responsables. La problématique de la variabilité des rendements sera abordée en privilégiant une analyse du fonctionnement du peuplement de maïs dans un réseau de parcelles paysannes, selon une méthode du type de celle utilisée par Diouf (1990) sur le mil au Sénégal, Scopel et Louette (1992) sur le maïs au Mexique, Leterme et al (1994) sur le blé en France, Wey (1998) sur le maïs au Burkina Faso et Sène (1999) sur le sorgho au Sénégal.

CHAPITRE I : REVUE BIBLIOGRAPHIQUE

I.1 *Systématique*

Le maïs (*Zea mays* L) est une monocotylédone appartenant à l'ordre des Glumales, famille des graminées (Poacées), tribu des Maydae ou Tripsaceae. Il est la seule espèce de ce genre. Les autres espèces du genre *Zea*, appelés communément téosinte et les espèces du genre *Tripsacum* sont les formes parentales de *Zea mays*.

I.2 *Origine*

Diverses théories concernant l'origine du maïs ont été décrites mais il existe de nombreux désaccords concernant l'origine de cette plante même si l'on s'accorde pour penser que son évolution vers des formes plus modernes s'est essentiellement déroulée en Amérique Centrale.

I.3 *Utilité du maïs*

Les utilisations du maïs varient beaucoup selon le niveau économique du pays. En région tropicale, le maïs est consommé en épis grillés, cueillis avant maturité où les grains sont mangés directement sur la rafle et surtout en couscous et en bouillis. Le maïs est aussi utilisé dans l'alimentation des volailles et porcine.

Le grain de maïs est d'abord un aliment énergétique, grâce surtout à sa teneur en amidon. Il est également assez riche en huile ; mais sa teneur en protéines de qualité est faible, ainsi que sa teneur en matières minérales (Rouanet 1997).

Au Sénégal, les tiges de maïs sont utilisées pour la fabrication de palissades mais aussi dans l'alimentation du bétail (chevaux, ânes, et bovins).

I.4 Le maïs au Sénégal

Au Sénégal, le maïs est en grande partie destiné à l'autoconsommation, la production nationale reste très insuffisante par rapport à la demande. En 2006, les importations de maïs étaient de 101000 tonnes dont 4000 tonnes étaient utilisées pour des semences (MDRA, 2007). Les importations de maïs sont essentiellement utilisées pour la fabrication des aliments de volaille (Broutin et al, 2000). Le pays est globalement déficitaire en céréales. On note des importations régionales, selon les résultats de la campagne de mil et de maïs du Mali (généralement apprécié en raison des variétés cultivées).

Le maïs est cultivé au Sénégal dans divers environnements agro-climatiques (figure 1). Dans le système pluvial, cette culture est pratiquée au sud de l'isohyète 600-700 millimètres (1) (Sarr et al, 1999), tandis que la culture irriguée se fait le long du fleuve Sénégal (2). Les caractéristiques générales des écosystèmes de culture de maïs dans le pays sont représentées dans le tableau I.

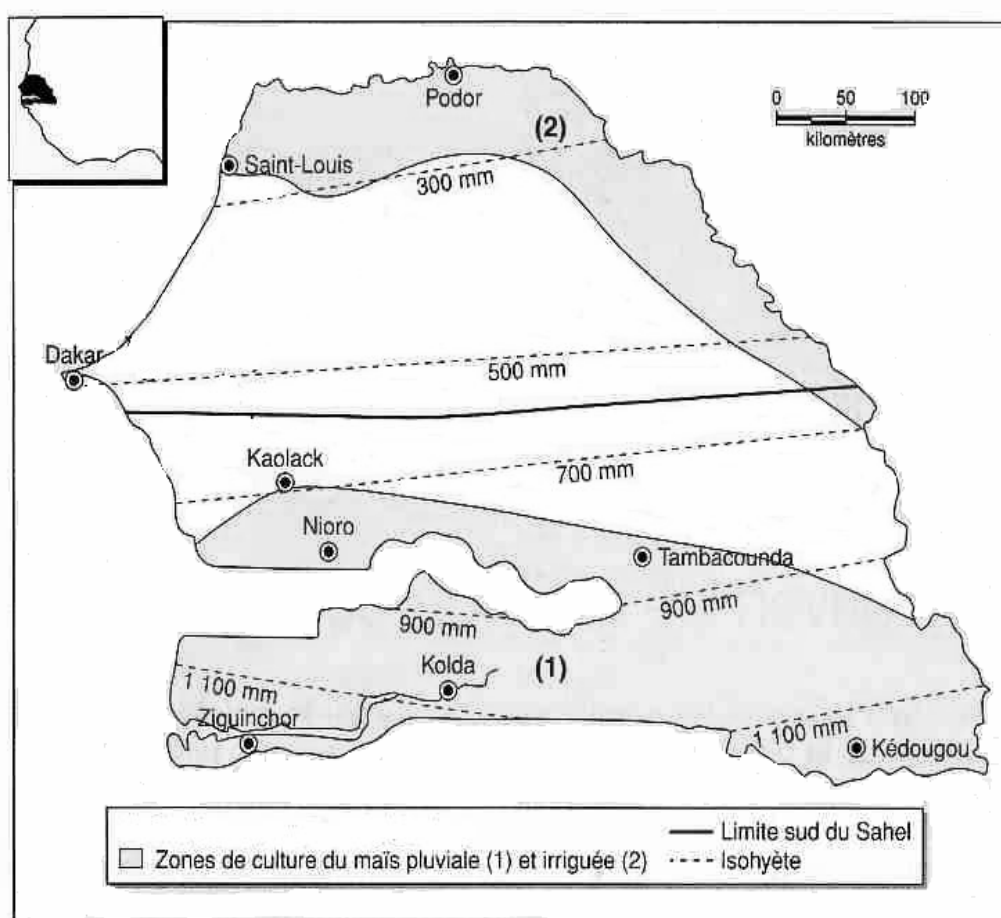


Figure 1: Zone de culture du maïs et cumuls pluviométriques moyens (1950-1997) au Sénégal (Sarr et al, 1999)

Tableau I : Caractéristiques générales des écosystèmes de culture du maïs au Sénégal.

(Sources : ISRA, 1985 ; USAID, 1997 cités par Sène 1999)

Zones écologiques	Pluviométrie (mm)	Types de sols dominants	Cultures pratiquées	Contraintes agronomiques principales pour l'activité agricole
Fleuve irrigué	< 200 irrigation	Alluvions	Mil Sorgho Maïs Riz (irrigué)	-Pluviométrie faible et très irrégulière -Salinisation des sols mal drainés -Pollution produits chimiques agricoles -Limitation culture de décrue
Sud du Sine Saloum	400-800	-Ferrugineux tropical peu -Ferralitique	Mil Sorgho Maïs Riz Arachide Coton Pastèque	-Très faible présence de la jachère -Forte érosion et dégradation des sols -Fertilité très faible et acidification -Surexploitation et réduction pâturages -Extensification, forte diminution de la végétation boisée - Pluviométrie irrégulière
Sénégal Oriental	500-900	-Ferrugineux tropical peu -Ferralitique	Mil Sorgho Maïs Riz Arachide Coton	-Feux de brousse -Sols peu profonds et vulnérables à l'érosion si mise en culture -Déforestation par exploitation charbon
Casamance	> 1000	-Ferrugineux tropical peu -Ferralitique -Halomorphe	Mil Sorgho Maïs Riz Arachide	-Acidification terres hautes -Salinisation des bas-fonds rizicoles -Erosion sols peu profonds

Les cultures céréalières (mil, maïs, riz, sorgho, fonio) ont connu globalement une augmentation de leur production de 33% entre 1980 et 2004. Cette performance est due au mil qui voit sa production augmenter de près de 88 % pour seulement une hausse de 17% des surfaces emblavées. Le maïs voit sa production inchangée, alors que ses surfaces emblavées baissent de 3% (Sarr et Wade 2005).

En 2005, la production totale annuelle sénégalaise en maïs a atteint 399958 tonnes. Le rendement moyen à l'échelle nationale en champ paysan est de l'ordre de 2796 kg/ha. Le maïs (11,99 %) a occupé la troisième place derrière le sorgho (12,50 %) et le mil (67,13 %) des surfaces cultivées en céréales au Sénégal. Le maïs est, par sa production, la deuxième céréale du Sénégal après le mil (ANSD 2005).

Pendant la campagne agricole 2004/2005, le maïs a représenté dans la région de Tambacounda 132131 hectares pour une production de 193789 tonnes (ANSD 2005), soit 21,98 % de la superficie nationale en maïs et 22,36 % de la production en maïs au niveau

national, avec un rendement moyen de 1467 Kg/Ha. Des données de la situation céréalière du département de Tambacounda sont présentées dans l'annexe 4.

1.5 *Pratiques paysannes*

L'itinéraire de conduite de la culture du maïs s'avère extrêmement fluctuant et peut varier. Sy (2004) a mis en exergue une diversité de pratiques paysannes, dans le département de Vélingara, qui est due pour la plupart aux caractéristiques des exploitations qui sont généralement, le sous équipement, le manque de main d'œuvre, la baisse de la fertilité des sols, la difficulté d'acquisition d'intrants. Dans leurs propositions de recommandations agronomiques, Chopart et Koné (1994) ont préconisé que : l'agriculteur a intérêt à adopter un système de culture moyennement intensifié comprenant un travail du sol et une fertilisation modérée. En milieu paysan les systèmes de culture se révèlent très variables, au sein d'un village, d'une maison ou même d'une parcelle de culture (Diouf, 1990).

Au niveau des variétés, l'utilisation des semences locales est largement dominante. La pureté variétale n'est qu'approximative ; il n'est pas rare de rencontrer, sur un même épi de maïs, des grains violets, blancs et jaunes (Wey, 1998).

L'organisation de la distribution des intrants n'est pas la meilleure en milieu paysan (Coly, 2004). Par exemple, d'après Sy (2004) la définition des rôles des différentes structures dans le département de Vélingara n'est pas au point. Il y'a une confusion dans la mesure où un producteur peut prendre ses semences de la World Vision, l'urée de la SDDR, le NPK de la SODAGRI et l'herbicide de l'ANCAR.

Quant à la variabilité de production, Ndiaye (1997), l'a mesurée en milieu paysan et a montré que l'augmentation de la productivité du maïs demande une amélioration des systèmes de culture qui sont à la portée des paysans.

1.6 *Itinéraires techniques proposés par la recherche*

L'itinéraire technique est une conduite cohérente de la culture, tout au long de son cycle de végétation, dans un milieu naturel et social donné. Cela signifie, en particulier, que toutes les opérations sont interdépendantes et sont décidées par un agriculteur (Memento, 2002).

Cortier et al (1988) ont formulé cette recommandation pour améliorer la productivité du maïs : vulgariser par ordre de priorité la fertilisation minérale NPK 200 kg/ha + urée 200 kg/ha, puis le labour en traction attelée à 12-15 cm de profondeur.

En annexe 5, nous avons présenté un résumé de la fiche technique pour la culture du maïs proposée par Camara (1985).

I.7 Cycle du maïs

Le maïs est une céréale herbacée annuelle, à tallage généralement faible ou même nul contrairement aux autres céréales qui ont gardé leur capacité de tallage. Le développement d'une plante de maïs a été décrit avec d'excellentes illustrations dans la publication *How a corn plant develops* (Ritchie et Hanway, 1992). La vie du maïs, du semis à la récolte, est une succession d'étapes qui aboutissent à la formation puis à la maturation des grains. Chacune de ces phases correspond à la formation d'un ou de plusieurs organes. Ce cycle du maïs se divise en plusieurs étapes : la germination, la levée, la formation des organes végétatifs, la formation des organes reproducteurs, la fécondation, le remplissage et la maturation des grains.

I.7.1 La germination

C'est le passage de la vie ralentie à la vie active. Dès que les semences de maïs sont placées dans un milieu humide et chaud, qui peut être le sol après le semis, les mécanismes biologiques reprennent. C'est la germination qui correspond d'une part à l'imbibition du grain et d'autre part à la solubilisation des réserves (Gay, 1983). L'imbibition est un phénomène purement physique de différence de potentiel. Elle provoque un enchaînement de réactions biochimiques : la respiration s'accélère et une partie des réserves est brûlée, entraînant la synthèse d'enzymes et de vitamines qui activent les bourgeons de l'embryon (figure 2). Extérieurement, la germination se traduit par un gonflement et un ramollissement du grain. Elle se termine lorsque la radicule perce l'enveloppe du grain.

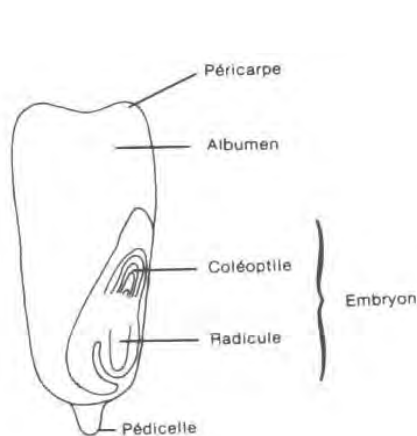


Figure 2: Coupe d'une graine de maïs (Source Rouanet, 1997).

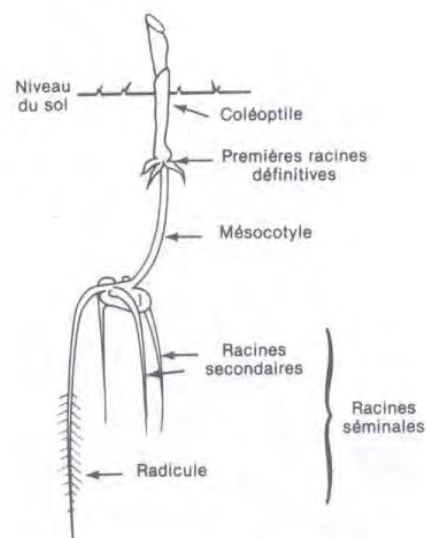


Figure 3 : Une plante de maïs au stade « levée » (Source Rouanet, 1997)

I.7.2 La levée

Elle a lieu lorsque le coléoptile perce la surface du sol. Ce stade marque une étape variable dans la croissance de la plantule, fonction notamment de la profondeur du semis (Barloy, 1983 b). Au niveau de la parcelle ce stade est atteint lorsque 50% des plantes ont le coléoptile visible. Le système racinaire séminale se met en place au moment de la levée et peut atteindre plusieurs cm de profondeur en quelques jours (figure 3).

I.7.3 La formation des organes végétatifs

La période qui précède la floraison peut être partagée en deux phases principales presque égales, elles-mêmes séparées par le court intervalle existant entre l'initiation mâle et l'initiation femelle (Ruget, 1994). La première dure 38 à 42 % de l'ensemble levée-floraison et correspond à la différenciation des feuilles non préformées dans l'embryon et au début de mise en place des feuilles et des racines. La seconde correspond à l'ensemble de la différenciation florale femelle qui mène jusqu'à l'épi. Sitôt la levée, la première feuille se déroule et laisse apparaître la seconde puis la troisième qui forme le cornet.

Ces dernières se déploient rapidement pour donner une plantule au stade 3-4 feuilles, marquant souvent une pause dans le développement des parties aériennes (Gay, 1983). Le rythme d'initiation des feuilles est constant de la levée à l'initiation de la panicule (Warrington et Kanemasu, 1983). Au début de la période de végétation, le plant de maïs n'augmente de poids que lentement. Mais à mesure que s'accroît le nombre de feuilles exposées à la lumière, l'accumulation de matière sèche s'accélère progressivement (FAO, 1987).

Le système racinaire séminale alimente la plante jusqu'au stade 5-6 feuilles, en complémentarité avec les réserves de la semence. Ensuite il cesse d'être fonctionnel et les racines coronaires prennent le relais (Gay, 1983). Ceci correspond au passage du régime hétérotrophe au régime autotrophe.

La tige est un empilement de nœuds et d'entre nœuds. Au niveau de chaque nœud sont insérés une feuille et un bourgeon. Elle se termine par le bourgeon qui va fabriquer la tige et les feuilles puis la panicule. La morphologie du pied de maïs est représentée dans la figure 4.

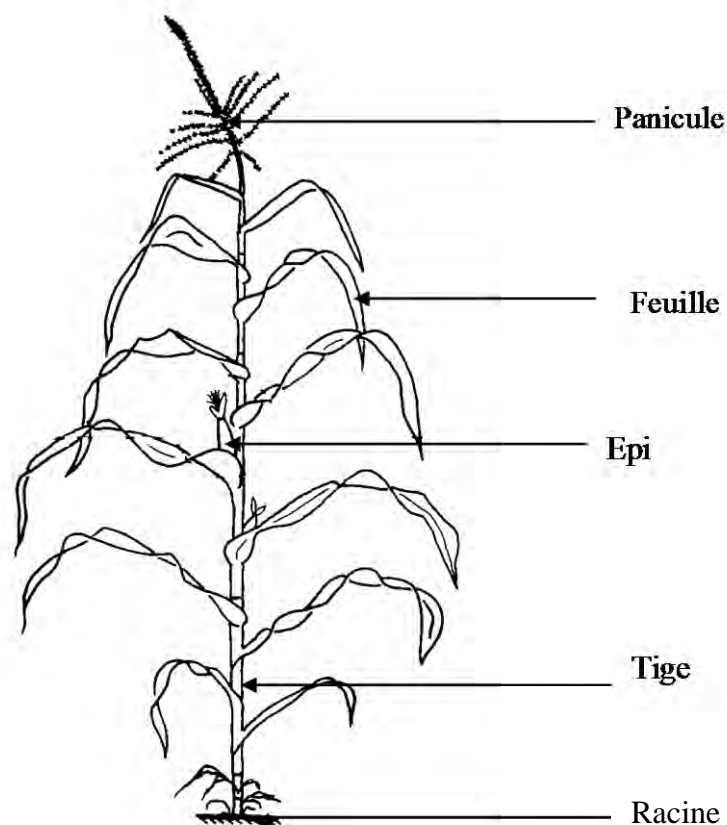


Figure 4 : Morphologie d'un pied de maïs (Source : AGPM, ITCF, 1979)

1.7.4 La formation des organes reproducteurs

Le maïs est une plante monoïque (séparation des fleurs mâles et femelles sur la même plante) et allogame. La floraison chez le maïs est généralement protandre, c'est-à-dire les fleurs mâles apparaissent avant les fleurs femelles. La formation des organes reproducteurs se déroule dans la continuité des organes végétatifs.

1.7.4.1 La panicule

Elle se forme à l'extrémité de la tige par le bourgeon terminal, après la dernière feuille. Les ébauches florales qui apparaissent sur les ramifications et sur l'axe principal de la panicule, se divisent en deux pour former les épillets. Chaque primordium se divise ensuite pour donner les glumes, les glumelles et les fleurs (figure 5). Au moment de la formation de la fleur, quatre ébauches dont trois vont donner les étamines, alors que la quatrième, qui correspond à un pistil, dégénère. Différenciation cellulaire et méioses successives conduisent au grain de pollen d'un diamètre voisin d'un dixième de millimètre (Wey, 1998).

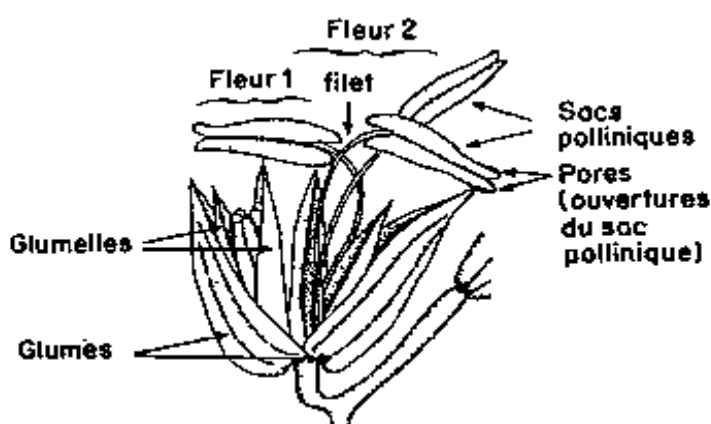


Figure 5 : Inflorescence mâle (Source Blondon, 1983)

1.7.4.2 Epis

Les bourgeons axillaires associés aux feuilles du milieu de la tige évoluent pour donner les épis. Ils sont au nombre de 4 ou 5 sur chaque pied de maïs. Toutefois, en condition normale, un seul va au terme de son évolution, les autres dégénèrent (Gay, 1983).

Dès leur formation qui est antérieure à celle de la panicule, les bourgeons axillaires évoluent et initient une tige (le pédoncule), des feuilles (spathes), des bourgeons axillaires secondaires. Le bourgeon axillaire formant l'épi est couvert par 12 à 14 feuilles modifiées appelées spathes

(Paliwal, 2002 b). Le méristème s'allonge et les premières ébauches apparaissent. Chacune se divise en deux pour donner les épillets. L'épi ne présente pas de ramification. Les épillets sont regroupés par paire. Chaque épillet comprend deux fleurs mais une seule se développe. L'autre fleur avorte très tôt en général (Blondon, 1983). La fleur présente contient 4 primordia. Trois d'entre eux donnent des étamines (Gay, 1983) qui avortent tard, juste avant la méiose, le quatrième un pistil à trois carpelles dont deux s'allongent et donnent la soie (figure 6). Au cours du temps se détermine le nombre des rangs sur l'épi, la longueur des rangs et le nombre d'épis par plante.

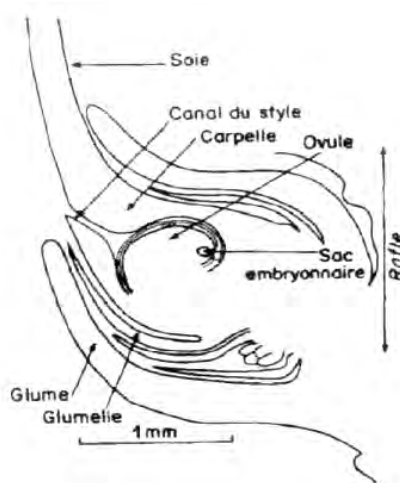


Figure 6 : Coupe de l'ovaire (Source Blondon, 1983)

I.7.5 La floraison et la fécondation

La floraison mâle correspond à la libération du pollen et la floraison femelle à la sortie des soies. Dans une parcelle, ces mêmes stades ont lieu lorsque 50% des plantes sont en fleur. En règle générale, la libération du pollen débute 1 à 2 jours avant la sortie des soies. Ce décalage peut être accentué si la plante souffre.

Compte tenu du décalage entre sortie des soies et libération du pollen sur une même plante, les soies d'une plante sont fécondées en majorité par le pollen d'une autre plante (Girardin, 1991). La pollinisation correspond au transport du grain de pollen de la panicule à la soie. Lorsqu'il tombe sur les soies, le grain de pollen germe et va féconder l'ovule, organe reproducteur femelle situé à la base de la soie. Si la fécondation est bonne, chaque ovule donne un grain.

I.7.6 Le remplissage et la maturation des grains

La phase de remplissage correspond à l'accumulation dans le grain des produits issus de la photosynthèse qui, provisoirement, s'étaient auparavant accumulés dans la tige, les racines et la rafle (Gay, 1983). Pendant cette période le grain se gonfle, prend sa taille définitive et l'embryon se forme. Au cours de son remplissage, le grain passe par différents stades déterminés par la croissance mécanique du grain : de *laiteux* où le grain atteint sa forme et ses dimensions définitives, il devient *pâteux* (s'écrase facilement), puis *vitreux* où il commence à se durcir (Gay, 1983).

Pendant la période de la maturité, le grain perd de l'eau ; son humidité est ramenée à moins de 40% (Girardin, 1991).

I.8 La phénologie du maïs

Le maïs est une plante de jours courts. Quatre phases classiques sont divisées au cours de son développement : la phase végétative, la phase sensible au photopériodisme, la phase reproductive et la phase de maturation des graines. Excepté la deuxième phase, toutes les phases sont définies par une durée en degré jours (T° du jour – T° de base) : il faut durant une phase donnée atteindre un cumul de degré jour pour passer au stade suivant. La durée de la phase 2 dépend de la photopériode quotidienne : elle varie en fonction de la latitude et de la date. La température de base est de 11°C en climat tropical (Lafarge, 1998 cité par Diaou, 2003), elle est couramment utilisée pour le maïs, comme échelle chronologique des différentes phases physiologiques.

I.9 Influences des facteurs et des conditions du milieu

I.9.1 Stress hydrique

Un stress hydrique aura des conséquences négatives sur le rendement quelle que soit la période où il se produit. La réponse de la plante au stress hydrique est complexe car elle dépend à la fois de la sévérité du stress, de la durée du stress, de la phase du développement et de l'état dans lequel se trouvait la plante quand le stress a eu lieu (Olufayo, 1994). Cependant les phases au cours desquelles les conséquences sont les plus graves sont d'une part le semis

et les deux semaines qui le suivent et d'autre part les deux semaines qui précèdent et les deux semaines qui suivent la floraison (Mémento, 2002 ; Lafitte, 2002 ; Hema, 2000). Le stress peut induire une mortalité des très jeunes plantes encore faiblement enracinées, et donc une réduction importante de la densité. Il peut affecter aussi la phase finale de formation des ovules et des grains de pollen, la pollinisation, la fécondation, ou le début du remplissage et développement des grains, et entraînant donc des baisses de rendement. Selon Salah (1996) un déficit hydrique provoque une réduction de la vitesse d'allongement des feuilles. Il entraîne aussi le ralentissement de la phase végétative (Arora et Garjri, 2000). La sécheresse entraîne une réduction du nombre de plantes pendant l'établissement de la culture, réduit la photosynthèse par son action sur les stomates et sur la biochimie de la plante, et enfin limite la formation de réserve aux alentours de la floraison (Lafitte, 2002).

Le maïs ne peut réussir qu'en zone bien arrosée où les conditions hydriques ne sont pas limitantes (Sarr et al, 1999). Or le maïs tropical est rarement irrigué, en particulier parce qu'en général il n'y a pas d'infrastructures, et surtout car cela ne serait sans doute pas rentable dans la plupart des cas, sauf à obtenir des rendements très importants. En raison de la variabilité naturelle de la pluviométrie, particulièrement en zone soudano-sahélienne, le stress hydrique peut survenir à n'importe quel moment du cycle de la culture. Dans les pays de la zone soudano-sahélienne les rendements sont très liés au régime hydrique (Cortier, 1994).

I.9.2 Fertilité des sols

Le maïs dépend pour sa croissance des éléments minéraux. Le manque d'azote nécessaire à la formation structurelle et enzymatique des protéines a pour conséquence immédiate une réduction de la croissance des feuilles et des grains (Lafitte, 2002). Le premier symptôme visuel d'un déficit en azote se manifeste par une croissance réduite de l'appareil végétatif, suivi d'un jaunissement et parfois sénescence des feuilles les plus basses.

Le déficit en phosphore se manifeste par une croissance réduite, un rougissement des feuilles et une petite taille de l'épi. La carence chimique la plus fréquente des sols en Afrique est celle du phosphore (Pieri, 1986 cité par Ndiaye et Sidibé, 1992). Une déficience en phosphore réduit très tôt et très fortement la croissance foliaire (Mollier, 1999).

Les sols acides sont caractérisés par une toxicité de certains minéraux, comme l'aluminium (Al), le manganèse (Mn), et déficits en calcium (Ca) et magnésium (Mg) (Lafitte, 2002).

I.9.3 Température

La réaction du maïs à la température varie selon le stade de croissance (FAO, 1987). La température affecte directement le rendement en influençant le taux de croissance, la répartition de la matière sèche, le taux de développement et enfin la durée du cycle de la culture (Ndiaye, 1997). Elle a une influence sur le déclenchement de la transition florale et une influence sur les dimensions finales des organes (Fournier, 2000). Selon Lafitte (2002), les températures élevées aux champs sont dans de nombreux cas associées à des périodes de faible pluviométrie, les effets des températures sont alors confondus avec ceux de la sécheresse.

I.9.4 La lumière

Le maïs est très exigeant vis-à-vis de la lumière. Le manque de luminosité dans les pays équatoriaux de basse altitude peut entraîner parfois des limitations au rendement (Rouanet, 1997).

I.9.5 Facteurs biotiques

Les maladies du maïs sont variées. Nous en citerons quelques unes en guise d'exemple : le nanisme, la fusariose, le charbon, la sésamie, le mildiou, la pourriture, la rouille, etc. (Maurin et al, 1999, Paliwal, 2002 c). De nombreux agents comme les champignons ou les prédateurs animaux contribuent aussi à retarder le peuplement. Les méthodes de lutte les plus efficaces sont l'utilisation des variétés résistantes, l'utilisation des semences traitées, l'application d'insecticides en cours de végétation, etc.

Le maïs est extrêmement sensible à la concurrence des adventices (Lavabre, 1988), qui entrent en compétition avec le maïs pour les ressources (eau, éléments minéraux, lumière, etc.) du milieu.

Le striga (*Striga hermontica*) est un adventice parasite redoutable, qui s'accroche aux racines pour assurer ses besoins en eau et éléments nutritifs, et est susceptible de provoquer des dégâts importants.

I.10 L'élaboration du rendement

L'analyse de l'élaboration du rendement est menée en fonction de deux objectifs principaux (Fleury, 1991) :

- elle vise à obtenir un diagnostic, c'est-à-dire à comprendre pour quelles raisons le rendement s'est établi au niveau observé ; on utilise dans ce but des méthodes rétrospectives (enquêtes sur les rendements et collecte des renseignements enregistrés) ;
- elle cherche à préparer des décisions d'agriculteur à partir des prévisions du comportement du peuplement végétal, compte tenu des états probables du milieu.

I.10.1 Les composantes du rendement

L'analyse du rendement conduit à examiner ses diverses composantes, à isoler les principales, à dresser leur hiérarchie et à rechercher leurs modalités d'élaboration en vue de comprendre le fonctionnement de la culture étudiée (Barloy, 1983 a). Les premières études ont été réalisées par Engledow (1923) cité par Wey (1998) dans une perspective d'amélioration végétale en retenant les composantes « nombre d'épis par plante » (NEP), « nombre de grains par épi » (NGE) et « poids unitaire du grain » (PG) comme critères de sélection. Pour Gay et Bloc (1983) le rendement chez le maïs est le résultat de la multiplication de six composantes de base qui sont :

- le nombre de plante par hectare ;
- le nombre d'épis par plante ;
- le nombre de rangs d'ovules par ébauche d'épis ;
- le nombre d'ovules par rang ;
- le pourcentage de fécondation ;
- le poids de 1000 grains.

Pour Fleury (1991) les composantes se limitent à trois : la première donne la référence de surface (nombre de pieds au m^2 ; NP), la seconde un degré de ramification (nombre de grains par pied, NGP), la troisième un état de croissance unitaire (poids d'un grain, PG). Le rendement peut donc s'écrire : $RDT = NP * NGP * PG$.

L'analyse des composantes permet de porter un diagnostic car la formation de chaque composante correspond à une phase particulière du cycle : la phase végétative correspondant

au NP, la phase reproductive correspondant au NGP et la phase de maturation correspondant au PG.

Le rendement final résulte (figure 7) de la multiplication du nombre de grains par le poids moyen du grain (Memento, 2002).

Les limites ne sont pas clairement établies et chaque composante recoupe partiellement les autres (Lorgeou, 1991 ; Bonhomme et Ruget 1991)

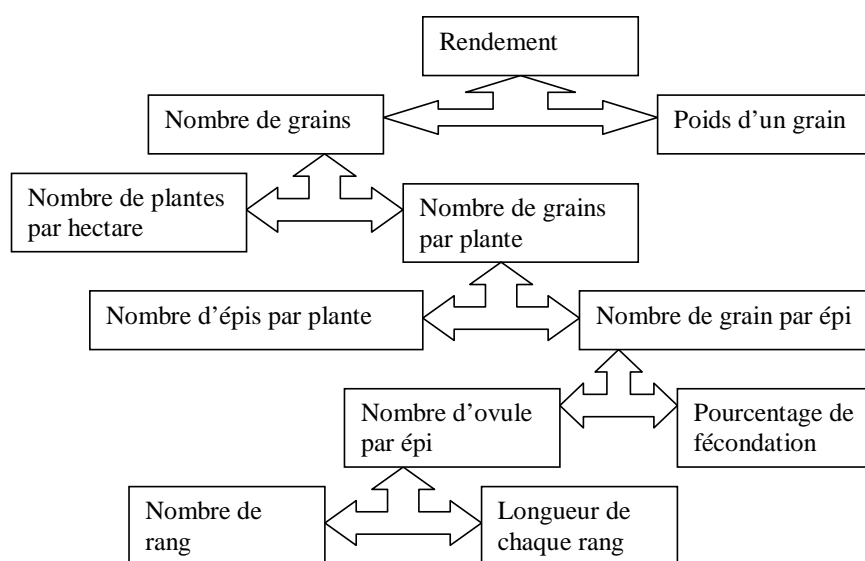


Figure 7 : Schéma d'élaboration du maïs (Source : Memento, 2002)

I.10.2 Relations entre composantes

Comme les phases d'élaboration des composantes successives ne sont pas complètement disjointes, il serait intéressant de connaître les relations qui existent entre les composantes. Ces relations permettront de savoir les périodes de fonctionnement où la plante a été le plus perturbée (Scopel et Louette 1992).

Fleury (1991) puis Siband et al. (1999) ont montré que les composantes sont reliées par des relations de compétition pour les ressources du milieu. La valeur de la première composante (nombre de plante/hectare) détermine fréquemment la valeur maximum des composantes suivantes. Une relation hyperbolique a été établie par Leterme et al. (1994) entre les valeurs des composantes nombre de grains par mètre carré et poids de grains. Le produit correspondant au poids de grains par mètre carré, c'est-à-dire au rendement.

I.11 Variabilité des rendements

La grande variabilité interannuelle et spatiale des rendements de cultures est une des caractéristiques majeures de l'agriculture pluviale d'Afrique de l'ouest (Affholder, 1994). Pour identifier les causes de cette variabilité des rendements, il faut suivre une démarche expérimentale. Douay (1997), dans ses résultats, a trouvé une forte variabilité des rendements de maïs dans le temps et dans l'espace à l'intérieur d'un même échantillon.

C'est pourquoi Forest et Clopes (1994) ont écarté définitivement l'hypothèse trop simplificatrice tendant à considérer la pluviosité comme le seul facteur explicatif direct du rendement.

Au Sénégal, une variabilité de rendement de maïs a été notée durant les cinq dernières années de campagne agricole (tableau II).

Tableau II: Variabilité des rendements de maïs des 5 dernières années au Sénégal

(Source DAPS)

Années	2003	2004	2005	2006	2007
Rendements (Kg/Ha)	2283	2719	2796	1392	1098

CHAPITRE II : MATERIEL ET METHODES

II.1 *Caractéristiques agro-écologiques de la région d'étude*

II.1.1 Localisation géographique

L'étude s'est déroulée au Sud-Est du Sénégal, dans la région de Tambacounda communément appelée Sénégal Oriental. Cette région est située entre 12°20 et 15°10 de Latitude Nord et 11°20 et 14°50 de Longitude Ouest. C'est la région administrative la plus vaste du pays avec 59602 km² soit 30% du territoire national. La zone d'étude (cf. annexe 1) se trouve dans la partie Sud du département de Tambacounda plus précisément dans la communauté rurale de Missirah.

II.1.2 Caractéristiques climatiques générales

De par sa position géographique, le département de Tambacounda est situé à la limite des zones sahéliennes et soudaniennes. Le climat est caractérisé par deux saisons : une saison sèche de novembre à avril et une saison des pluies de mai à octobre. Cette région n'est en effet soumise à l'alizé continental que pendant environ six mois, marqués par des températures élevées et une atmosphère très sèche. Les températures moyennes oscillent entre 19 et 35°C, la moyenne annuelle se situant aux alentours de 29°C. La saison des pluies dure près de six mois et reçoit des précipitations comprises entre 500 et 1000 mm. Elle comporte trois à quatre mois très pluvieux recevant chacun une tranche d'eau largement supérieure à 100 mm.

II.1.3 Caractéristiques climatiques de l'hivernage 2006

Un pluviomètre a été installé en début de saison des pluies dans chacun des 5 villages où nous avons réalisé nos suivis (photo 1). Ainsi les pluviométries journalières ont été enregistrées durant toute la saison pluvieuse dans tous les villages de nos sites d'enquête. Ces relevés sont complétés par ceux des postes officiels du département de Tambacounda. Au total les relevés

de 21 pluviomètres ont été enregistrés afin d'avoir la variabilité de la pluviométrie dans le département de Tambacounda.

Les autres paramètres climatiques (températures, humidités relatives, vitesses du vent, durées d'insolation, évaporations bac) ont été relevés dans la station météorologique régionale de Tambacounda. Notre village le plus proche (Hamdallaye Pont) est situé à environ 15 km au sud, et le plus éloigné (Birataba) à environ 50 km au sud. Compte tenu de la faible variabilité spatiale de ces paramètres, ces données sont utilisables pour les besoins de notre étude. Les évapotranspirations potentielles ont été déterminées par la formule de Penman Monteith, méthode standard préconisée par la FAO (1998).

2.1.3.1 Pluviométrie 2006 au poste officiel de Tambacounda

La comparaison du cumul de la pluviométrie de l'hivernage 2006 avec les années précédentes (figure 8) montre une baisse de 200 mm par rapport à la moyenne : 528,6 mm (en 46 jours de pluie) contre 714 mm en moyenne à Tambacounda (en 58 jours de pluie) sur les 10 dernières années, et 784 mm sur les 3 années précédentes (en 57 jours de pluies).

Les mois d'août et de septembre ont été les plus pluvieux (figure 9a) dépassant chacun 100 mm. Aucune pluie n'a été enregistrée dans la première décade du mois de juillet tandis que la première décade du mois d'août a été la plus pluvieuse avec 117,8 mm.

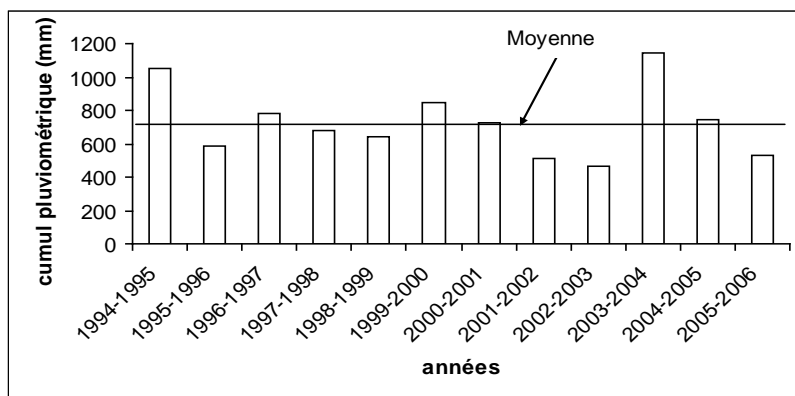


Figure 8 : Pluviométries annuelles de la station de la météo de Tambacounda

2.1.3.2 Pluviométries 2006 dans nos villages

Les répartitions des pluies décadaires de la saison pluvieuse des différents villages enquêtés sont représentées aux figures 9b à 9f. La saison pluvieuse a duré 5 mois (juin à octobre).

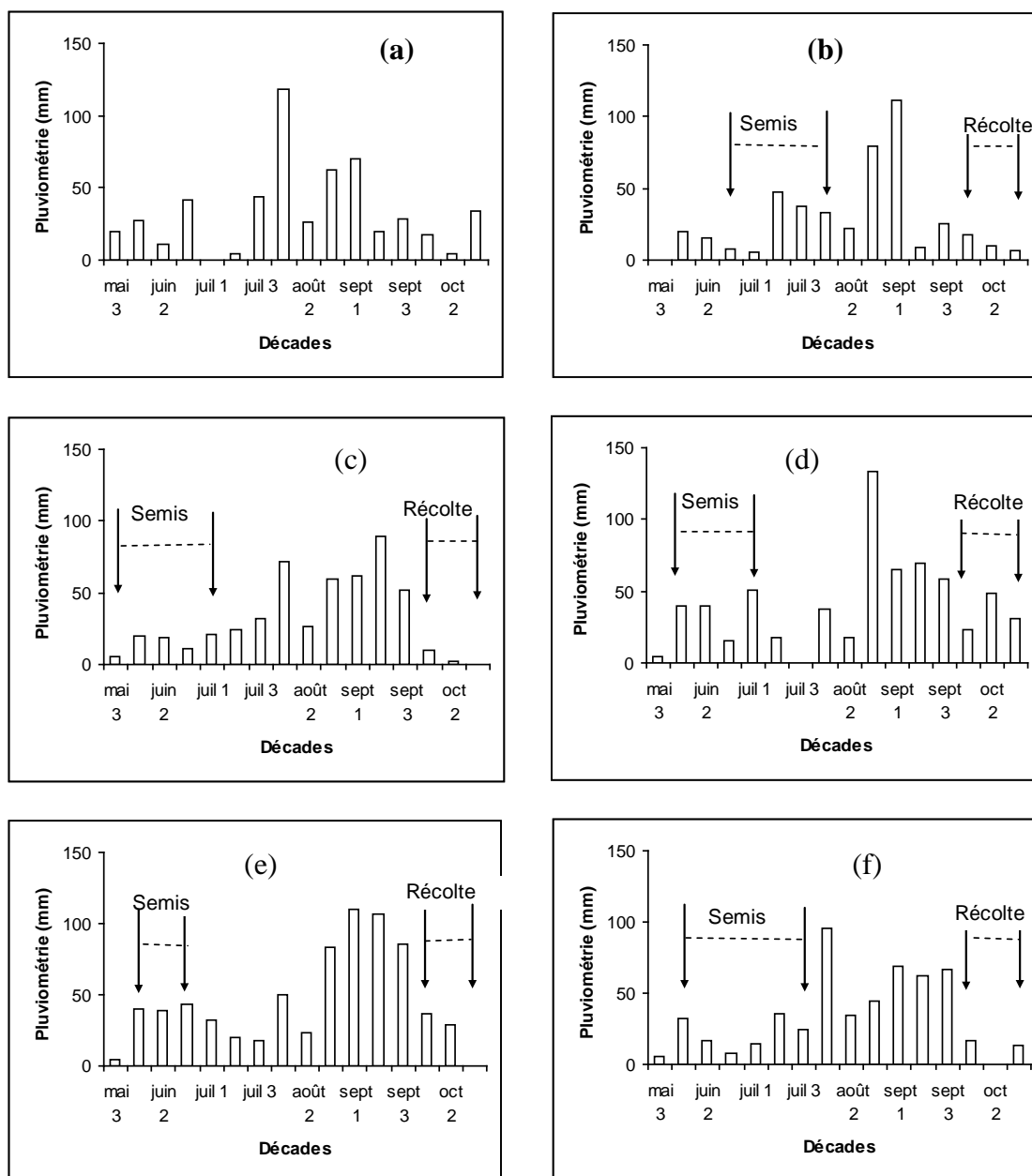


Figure 9: Répartition de la pluviométrie décadaire de la campagne agricole 2006 : (a) station météo ; (b) Hamdallaye Pont ; (c) Madina Diam ; (d) Birataba ; (e) Fougoulou ; (f) Saroudia (Mai 3 = 3^{ème} décade du mois de mai ; juin 1 = 1^{ère} décade du mois de juin ; etc.)

On note un creux pluviométrique sur la période 15 juillet – 25 août (40 jours) qui est particulièrement marqué à Birataba (56 mm sur cette période ; 1,37 mm/jour en moyenne), un peu moins fort à Fougoulou (91 mm ; 2,22 mm/jour) et Hamdallaye Pont (92 mm ; 2,24 mm/jour). Il est peu marqué à Madina Diam (136 mm ; 3,32 mm/jour de pluie) et encore moins à Saroudia (185 mm ; 4,51 mm/jour).

A Birataba la baisse pluviométrique a pu affecté au cours des premières semaines de leur cycle les cultures semées tardivement, et lors des phases sensibles floraison-début remplissage les cultures semées précocement. C'est certainement la même chose à Fougoulou.

Les villages les plus pluvieux (Fougoulou et Birataba) sont situés plus au sud de la zone enquêtée. Les villages les moins pluvieux (Hamdallaye Pont et Madina Diam) se situent plus au nord. Les cumuls pluviométriques sont représentés dans la figure 10.

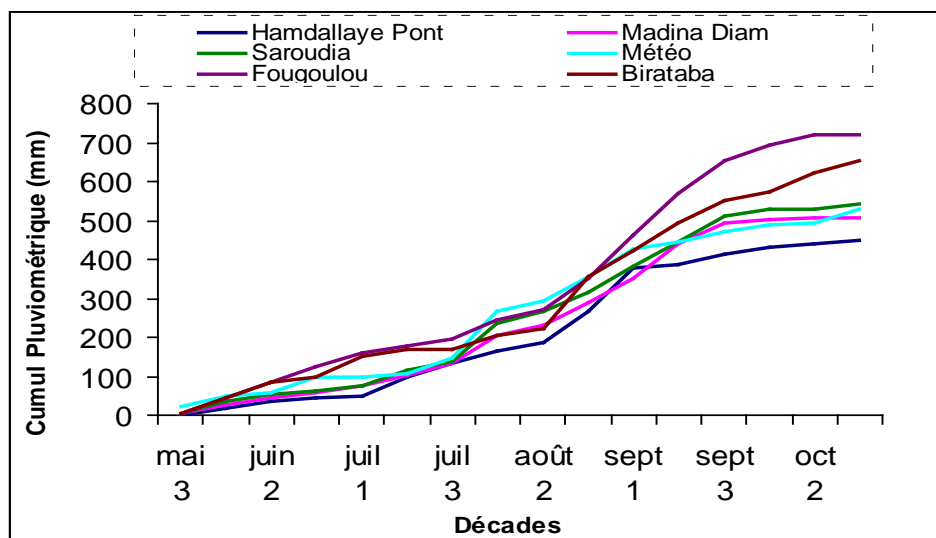


Figure 10: Cumul pluviométrique des villages suivis et la station météo de la campagne agricole 2006

2.1.3.3 Autres paramètres climatiques

Durant la période de l'hivernage (de mai à octobre), les autres paramètres climatiques mesurés sont représentés dans les figures 11a à 11e.

La moyenne journalière des températures a été de 29°C, les minima (T min) ont varié entre 14,8°C et 25,5°C et les maxima (T max) entre 27,7°C et 40,5°C.

Les humidités relatives maximales ont varié entre 32% et 100% et les humidités relatives minimales entre 7% et 84%. La moyenne journalière des humidités relatives a été de 66%.

La vitesse du vent mesurée à 10 m du sol a été variable. Elle a fluctué entre un maximum (3,89 m/s) et un minimum (0,75m/s).

La moyenne journalière de la durée d'insolation a été de 7h. Elle a varié entre 0 et 13h.

Les évapotranspirations potentielles (ET_o) ont varié de 2.07 à 8.92 mm/j avec une moyenne de 5,53 mm/j durant la campagne agricole 2006. En parallèle, les évaporations bac

journalières ont varié entre 1,2 à 15,5 mm/j avec une moyenne de 6,6mm/j. Les évaporations bac sont dans la grande majorité supérieures aux ETo.

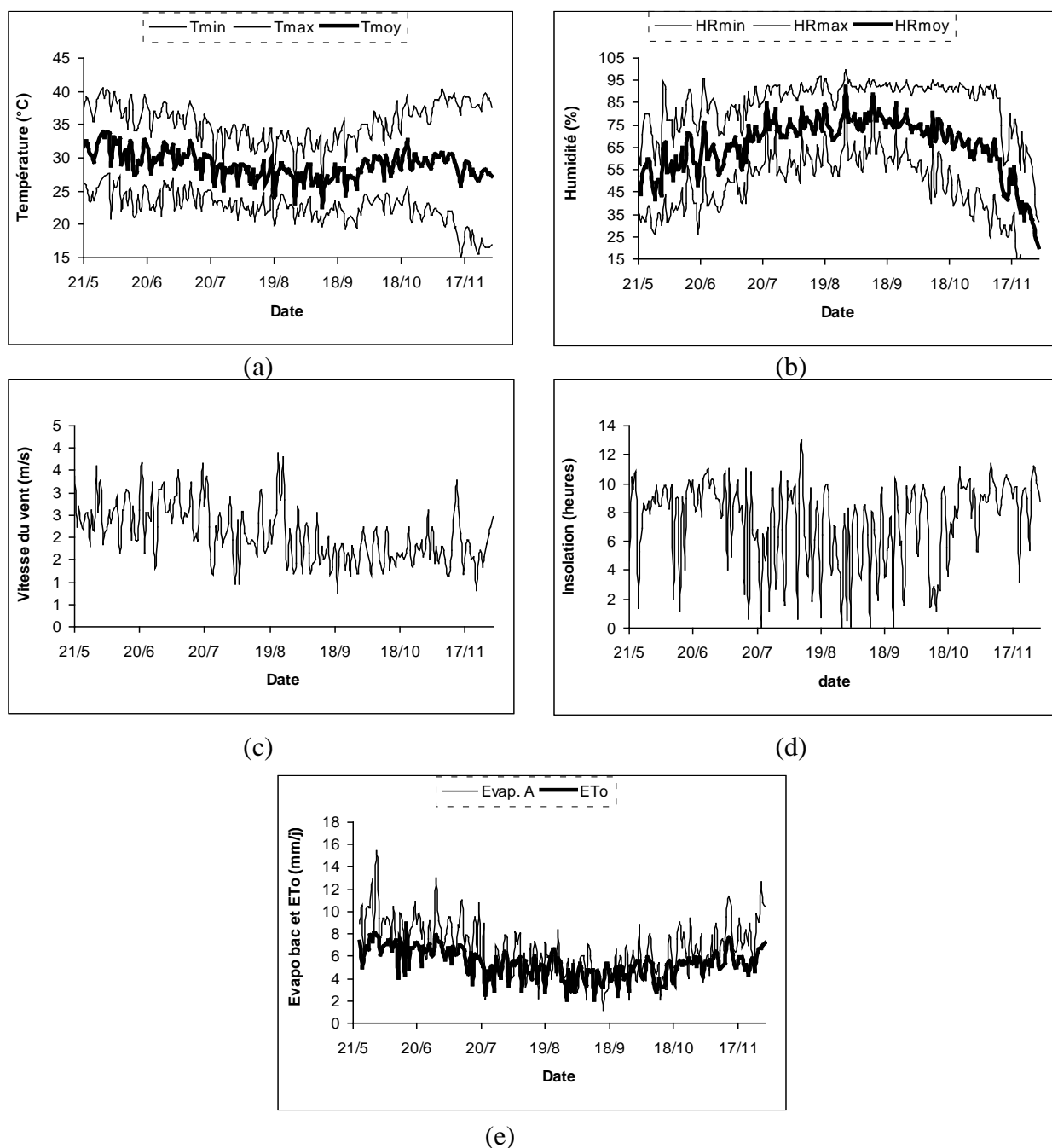


Figure 11 : Evolution des paramètres climatiques de la campagne agricole 2006 : (a) températures maximale, moyenne et minimale ; (b) humidités relatives maximale, moyenne et minimale ; (c) vitesse moyenne du vent ; (d) insolation ; (e) évaporation bac (Evapo bac) et évapotranspiration potentielle (ETo)

II.1.4 Les sols

Les types de sol dans notre zone d'étude sont : les lithosols, ou « sols minéraux bruts d'érosion », qui sont des sols peu évolués d'origine non climatique gravillonnaire ; les sols ferrugineux tropicaux lessivés, à concrétions et cuirasses ferrugineuses fréquemment affleurantes ; et les sols hydromorphes. Ces sols reposent sur des formations secondaires et tertiaires qui sont des grès argileux du Continental terminal (Michel et Sall, 1980) couvert d'une cuirasse ferrugineuse. La carte des sols de la zone d'étude est représentée dans l'annexe 2.

II.1.5 La végétation

La végétation est de type « savane boisée ». Le couvert végétal est abondant et varié compte tenu des conditions écologiques favorables à son développement et de la diversité des écosystèmes. Des arbres forment une forêt sèche qui surplombe un tapis herbacé de graminées vivaces dominée par les grandes andropogonnées. Ces herbacées, généralement annuelles, s'adaptent aux conditions mésologiques sans cesse changeantes (Ba et Noba, 2001). La strate arborée est dominée par *Cordyla pinnata* (le dimb).

II.2 Suivis - enquêtes des parcelles

II.2.1 Présentation

Les suivis - enquêtes ont été principalement ciblés sur les aspects agronomiques. Les aspects socio-économiques n'ont pas été pris en compte. Les suivis se sont déroulés durant la campagne agricole 2006. En pratique les suivis des parcelles ont été confiés à des observateurs locaux, paysans ou paysans avec d'autres fonctions : on avait par exemple un aide-infirmier, un alphabétisateur et un forgeron.

Des données d'ordre général ont aussi été prises au niveau du SDDR (service départemental du développement rural) de Tambacounda, de la SODEFITEX (société de développement des fibres textiles), de l'ANCAR (agence nationale de conseil agricole rural) et de la station météorologique régionale de Tambacounda.

II.2.2 Echantillonnage : choix des villages

Les choix ont en partie été conditionnés par le fait qu'un autre projet travaillait dans la zone, et qu'il était intéressant de rechercher une synergie au niveau des moyens logistiques. Les suivis-enquêtes ont donc été réalisés sur cinq villages parmi les villages considérés par l'autre projet dans la zone sud du département de Tambacounda, afin de prospecter une certaine variabilité au sein de cette région, en particulier pluviométrique. Il n'y a pas eu d'étude préliminaire approfondie : les critères de choix ont combiné la disposition spatiale des villages et leur accessibilité. Les cinq villages dont les coordonnées géographiques se trouvent dans le tableau III sont : Hamdallaye Pont, Madina Diam, Saroudia, Saré Fougoulou Pathé et Birataba.

Tableau III : Coordonnées géographiques des villages.

Village	Latitude	Longitude	Altitude (m)
Birataba	13°23' 28" N	13°27' 31" W	33,4
Hamdallaye Pont	13°37' 48" N	13°36' 13" W	27,9
Fougoulou	13°25' 20" N	13°27' 02" W	40,5
Saroudia	13°29' 33" N	13°33' 27" W	33,7
Madina Diam	13°34' 00" N	13°33' 36" W	52,4

II.2.3 Echantillonnage : choix des parcelles

Pour définir notre échantillon de parcelles, nous n'avons pas procédé au préalable à une analyse systématique et rigoureuse de l'ensemble des types de parcelles de maïs de chaque village, en relation avec leur position, leur mode de gestion et leur propriétaire. Cela aurait demandé trop de temps. L'autre solution de choix, tout aussi pertinente et bien plus pratique, était de procéder à un tirage au sort aléatoire de parcelles à partir de la liste des « carrés » (ou « grandes familles ») :

- on sélectionne au hasard un certain nombre de carrés du village, à partir de la liste établie par les autorités villageoises lors du dernier recensement national de l'agriculture ;
- on considère alors tous les champs de maïs des carrés sélectionnés : l'échantillon de parcelles ainsi obtenu est donc en principe parfaitement représentatif de l'ensemble des parcelles du village.

Nous avons souhaité procéder ainsi mais nous nous sommes heurtés au début dans les premiers villages à une méfiance et nous n'avons pas pu obtenir les listes complètes des carrés.

Nous avons donc procédé de façon moins rigoureuse pour choisir les parcelles. En fait, après avoir discuté avec quelques paysans et les observateurs et après avoir parcouru à pied les alentours des villages, nous avons eu une première vision globale des types de parcelles. On pouvait en particulier distinguer facilement des :

- (i) champs de case, très proches des habitations, et en général bien amendés ;
- (ii) des champs de brousse, non proches des habitations mais pas trop distants, en général cultivés régulièrement avec des rotations (coton, arachide, etc.) où le maïs revient souvent ;
- (iii) des champs de brousse éloignés, que nous appellerons champs des confins, le plus souvent assez récemment défrichés (1-2 ans auparavant) et où en général on a pas souvent du maïs.

Sur cette base nous avons demandé aux observateurs de choisir des parcelles en faisant en sorte qu'il y ait des champs des différentes catégories, et en respectant si possible les proportions : à savoir par exemple que si dans un village on sait qu'il y a une grande proportion de champs de maïs de brousse, on doit retrouver cela dans l'échantillon.

La différence entre « champs de brousse » et « champs des confins » n'est cependant pas très claire. Parfois on confondra ces catégories pour les analyses.

Nous ne pouvons donc prétendre à dire que l'échantillon est représentatif en terme de proportion des différents types de champs. Par contre nous pouvons dire que l'on a des informations concernant chaque type de champs. On ne peut donc tirer des informations statistiques rigoureuses relatives à l'ensemble des parcelles de maïs. Ces informations ne seront que des indicateurs. Nous pouvons par contre en tirer en relation aux différents types de champs.

Les suivis ont commencé sur 159 parcelles de maïs : environ 32 parcelles dans chaque village. Certaines parcelles ont été abandonnées par les paysans qui ne les ont pas récoltées : nous avons gardé ces parcelles dans notre échantillon, considérant qu'elles faisaient partie de la réalité (abandon de parcelles : rendement nul) et traduisaient des difficultés des agriculteurs.

XXXXXphotos

Par contre sur certaines parcelles nous n'avons pas pu obtenir des données complètes, soit sur les cycles, soit surtout sur les rendements, car les agriculteurs n'ont pas attendu que l'observateur, ou nous-mêmes, puissions les récolter : ces parcelles n'ont donc pas été considérées dans nos analyses. 120 parcelles de maïs ont été totalement suivies jusqu'à la récolte. Le nombre de parcelles retenues au final pour chaque village est résumé dans le tableau IV.

Tableau IV : Nombres et types de parcelles en fonction des villages enquêtés

	Fougoulou		Hamdalaye		Madina		Saroudia		Birataba		Total	
	Nb	%	Nb	%	Nb	%	Nb	%	Nb	%	Nb	%
Champs de case	17	65%	13	59%	23	85%	14	82%	10	36%	77	64%
C. brous. et conf.	9	35%	9	41%	4	15%	3	18%	18	64%	43	36%
Total	26		22		27		17		28		120	

Nb = nombre ; C. brous. et conf. = champs de brousse et confins ; % = pourcentage.

Les cartes des villages avec les positions des parcelles sont données en annexe 3.

II.2.4 Echantillonnage : origines des paysans

Les agriculteurs enquêtés appartiennent principalement à deux principales ethnies les peulhs (65%) et les diakhankés (32,5%). Des bambaras (1,7%) et des sarakholés (moins de 1%) sont retrouvés dans notre échantillon (tableau V). Nous n'avons pas obtenu des données sur la répartition exacte des ethnies des différents villages. Dans le département de Tambacounda les peulhs représentent 46,3%, les mandingues (diankhankés et socés) 17,6%, les bambaras 4,1% et les sarakholés 3,1 % (MAE, 2000). Dans les villages de Fougoulou et de Madina diam, seuls les peulhs sont présents. Ceci a une importance sur la fertilité car les peulhs possèdent plus d'animaux. Des données démographiques des villages suivis se trouvent dans l'annexe 4.

Tableau V : Répartition des ethnies d'agriculteurs de notre échantillon par village

Village	Peulh	Diakhanké	Bambara	Sarakholé
Birataba	3	25	0	0
Hamdallaye Pont	14	5	2	1
Fougoulou	26	0	0	0
Madina Diam	27	0	0	0
Saroudia	8	9	0	0

II.2.5 Contenu de l'enquête

Le questionnaire comportait plusieurs volets concernant :

- la position (éloignement) de la parcelle par rapport au village ;
- le précédent cultural sur les cinq dernières années ;
- la situation topographique de la parcelle et le type de sol ;
- l'itinéraire technique complet de la préparation du sol jusqu'à la récolte ;
- le développement de la culture et les aléas éventuels ;
- la densité.

Le questionnaire de l'enquête se trouve dans l'annexe 6.

Il est important de bien souligner qu'aucune recommandation n'a été faite aux agriculteurs concernant la conduite des parcelles de maïs.

a- Information de l'histoire du champ

Des enquêtes ont été réalisées pour déterminer les successions culturales, le précédent cultural direct et le type de rotation, les amendements (organiques par parcage de bétail ou par apport de fumier), les amendements minéraux (NPK et/ou urée) appliqués dans les parcelles durant les dernières années.

b- Itinéraire technique suivi par le paysan

Toutes les opérations culturales sont relevées, avec leur date, de la préparation du sol à la récolte : labour, semis, sarclages, démariage, buttage, apport d'intrants, usage d'herbicide, etc.

c- Suivi des cultures

Des mesures de densité de populations de plantes ont été faites dans chaque champ durant leur jeune âge. Les écartements entre lignes et le nombre de pieds par mètre sur les lignes ont été mesurés. Au moment de la récolte, la densité de population de plantes dans les placettes de rendement a été aussi mesurée.

A chaque passage dans une parcelle, toutes les informations visibles concernant le stade de développement et la croissance des pieds de maïs ont été notées.

Ces informations sont complétées par les appréciations des diverses adversités visibles (maladie, enherbement, striga, problèmes de ravageurs...).

II.2.6 Mesures des rendements

Trois placettes de rendement ont été positionnées au cours du cycle (entre montaison et floraison) dans chaque champ, en procédant au hasard (tirage d'un numéro de lignes et d'un nombre de pas ou de mètres) et en veillant à les mettre soit en diagonale, soit en zig-zag. On évitait aussi les termitières, les arbres et arbustes, et les zones où visiblement il y avait un problème particulier très localisé. Le fait d'avoir trois placettes de rendement permet de prendre en compte la variabilité au sein de la parcelle. L'emplacement des placettes de rendement a été délimité par des rubans de tissu rouge. La figure 12a représente par exemple la disposition spatiale en diagonale des placettes de rendement dans une parcelle.

Chaque placette de rendement comprenait 5 lignes de maïs sur 5 m de longueur. Compte tenu des écartements entre lignes d'environ 70-80 cm, cela donnait en général des parcelles d'environ 3,5-4 m par 5 m, soit de 17,5 à 20 m² (figure 12b). Pour les semis non réalisés au semoir maïs manuellement, on a considéré des parcelles de 5m par 5m, soit de 25 m².

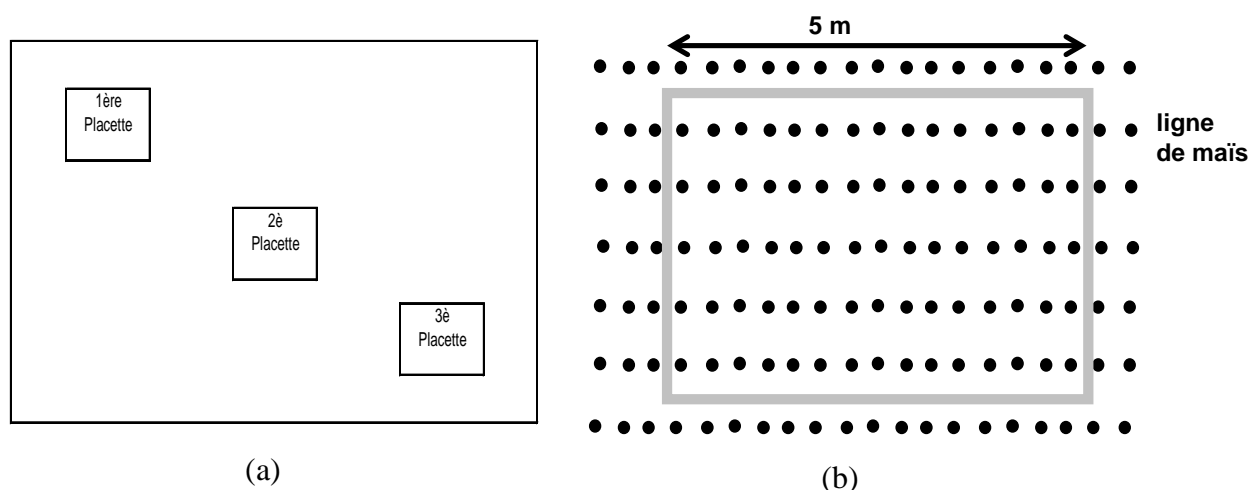


Figure 12 : Position et dimension des placettes de rendement

Les paramètres qui ont été mesurés à la récolte sur chaque placette sont :

- nombre total de pieds de maïs (tiges) présents ;
- nombre total d'épis ;
- poids de 10 tiges avec les feuilles, mais sans les épis : ces 10 tiges sont prises au hasard et pesées ; on les garde (dans des sacs) pour poursuivre leur séchage et pouvoir déterminer au final le poids de la biomasse sèche ;
- poids des épis : la méthodologie pratique a été la suivante :

- les épis ont été classés en quatre catégories : (i) grands épis, de taille supérieure à 15 cm en général ; (ii) épis moyens, entre 8 et 15 cm environ ; (iii) petits épis ; et (iv) petits épis sans grain. Le nombre d'épis dans chaque groupe est compté ;
- on constitue un échantillon aléatoire représentatif de tous les épis en prenant la moitié des épis de chaque catégorie ;
- on pèse cet échantillon et on le garde pour séchage.

Les biomasses (feuilles et tiges) et les épis sont séchés dans les villages. Quand les épis sont bien secs l'observateur les fait égrener pour récupérer les grains qui sont alors pesés. Des échantillons de grains et biomasses ont été ramenés jusqu'à Thiès pour vérifier leurs humidités.

II.2.7 Relevés au GPS des champs

Les champs enquêtés ont été géo-référencés (longitude, latitude et altitude) à l'aide d'un GPS qui restitue les données avec une précision de l'ordre de 5 mètres près. Le GPS est un système de navigation basé sur l'utilisation d'un réseau de 24 satellites placés en orbite. Ces derniers transmettent des signaux sous forme d'éphéméride et les récepteurs GPS traduisent ces signaux et par triangulation donnent la position exacte de l'utilisateur.

II.2.8 Bilans hydriques des parcelles

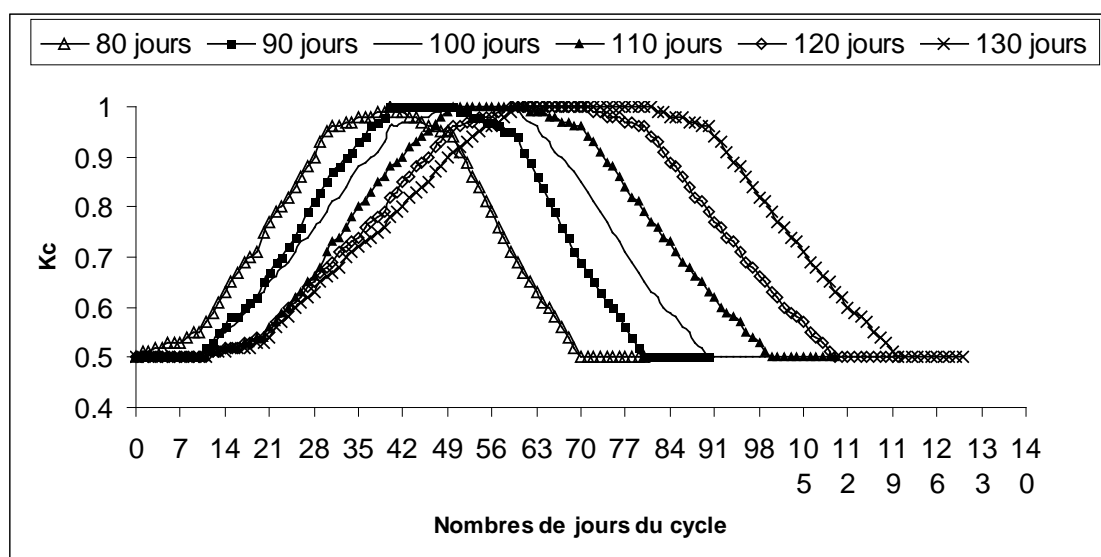
Nous avons développé sous SARRABIL (logiciel de simulation des bilans hydriques à partir d'un ensemble de paramètres décrivant le sol, la culture et le climat) des bilans hydriques journaliers des parcelles. SARRABIL est un module du logiciel SARRA (Système d'Analyse des Risques Agroclimatiques). Nous nous sommes basés sur les recommandations de la FAO (1998) et le travail de différents auteurs (Cortier et al., 1988 ; Poss et al., 1988).

SARRABIL permet de créer un fichier pour chaque parcelle agricole et un fichier pour toutes les cultures. Les cycles des cultures ont été déterminés d'après les dates de semis et de récolte : les cycles vont de 80 à 130 jours d'après les données recueillies.

Les évapotranspirations maximales (ETM) journalières, qui représentent les besoins en eau des cultures, ont été déterminées pour chaque parcelle d'après les évapotranspirations

potentielles (ET_o) et les coefficients culturaux (K_c), déterminés d'après les références de la FAO (1998) : $ETM = K_c \times ET_o$.

Les courbes d'évolution des coefficients culturaux K_c (figure 13) des cultures ont été établies en nous référant aux valeurs de la FAO. On a ainsi considéré : (i) pour le démarrage un K_c égal à 0,5 ; (ii) un coefficient K_c maximal de 1 pour la phase de consommation et sensibilité maximale (environ 10 jours avant floraison jusqu'à 10 ou 15 jours après, suivant les cycles) ; (iii) un coefficient de 0,5 pour la fin du cycle. La valeur 1 du K_c maximum a été retenue, et non pas une valeur plus élevée de 1,2 qui est théoriquement possible, car nous sommes en milieu paysan et le maïs n'y est pas dans des conditions optimales. Les K_c avant les semis (sol nu, labouré ou non, ou en friche) ont été pris égaux à 0,5. Pour chaque cycle, quatre phases (installation, reproduction, floraison et maturation des grains) ont été positionnées en relation à la longueur des cycles. La phase d'installation débute le jour du semis. Les évolutions des K_c sont présentées à la figure 13.



Le bilan hydrique a été établi sur un pas de temps journalier. L'évapotranspiration réelle de la culture (ET) dépend de l'état de la réserve en eau du sol. La réserve en eau du sol évolue en fonction des pluies et de l'évapotranspiration réelle de la culture (ET). Les ruissellements ont été estimés par des algorithmes utilisés dans Sarrabil qui ont été établis par Casenave et Valentin (1989) : nous avons considéré une hypothèse de ruissellements faibles compte tenu des pentes quasi inexistantes. Le modèle détermine les évapotranspirations réelles (ET et/ou ETR) (consommations réelles des cultures) selon un algorithme établi par Eagleman (1971).

On détermine ainsi les valeurs d'évapotranspirations réelles (ET) de la culture tout au long du cycle. Ces valeurs sont alors comparées aux besoins de la culture (ETM). On peut ainsi déterminer pour chaque jour le degré de satisfaction des besoins en eau :

$$ET\% = ET / ETM$$

Selon cette méthodologie nous avons déterminé, pour chaque parcelle, les degrés de satisfaction des besoins en eau de la culture à chaque jour du cycle. Pour les besoins des analyses nous avons ensuite considéré les indicateurs suivants :

- la moyenne et le minimum de ces valeurs sur le cycle ;
- la moyenne et le minimum lors de la phase d'installation de la culture (de 2 à 3 semaines) ;
- la moyenne et le minimum lors de la phase de développement final des organes reproducteurs : lors des 2 à 3 semaines avant floraison ;
- la moyenne et le minimum lors de la période des floraisons et pollinisation ;
- la moyenne et le minimum lors de la phase de remplissage des grains.

Les détails concernant les périodes considérées sont donnés en annexe 7. Les durées sont variables selon les durées des cycles.

II.2.9 Analyse des données

Les données de suivis-enquêtes et de rendements ont été saisies puis traitées sous Excel pour les analyses simples.

Des Analyses des Correspondances multiples (ACM) ont été réalisées à l'aide du logiciel SPAD version 3.5.

Le logiciel Statistix 8.1 a été utilisé pour l'analyse statistique.

Le logiciel SARRABIL a été utilisé pour l'analyse du bilan hydrique des cultures.

Les logiciels MapSource et Arcview ont été utilisés pour le traitement des données GPS.

CHAPITRE III : RESULTATS

III.1 ETUDE DES SYSTEMES DE CULTURE

III.1.1 Destination du maïs

Dans plus de 95% des situations, la culture du maïs est destinée à l'auto-consommation. Les paysans commercialisent seulement leur excédant de production.

III.1.2 Variétés

D'après le SDDR et l'ANCAR, deux variétés sont cultivées dans la zone d'étude. Il s'agit d'une variété de maïs blanc le Synthétique C et une variété de maïs jaune le JDB (Jaune Denté de Bambey). Ces deux variétés ont été vulgarisées en 1983 par l'ISRA (Ndiaye, 1987). La durée du cycle de ces deux variétés est de 90 jours. En réalité les agriculteurs n'utilisent plus ces variétés, mais des variétés « locales » qui en sont les descendantes : les semences résultent de tris successifs réalisés par les paysans après chaque campagne. Les variétés « locales » sont en général depuis plus de 10 ans entre les mains des paysans. Sur l'échantillon global, les variétés locales représentent plus de 99%. Cela traduit le fait qu'il n'y a plus de distribution facilitée de semences par l'Etat, et/ou que les prix pratiqués sont trop élevés pour les paysans.

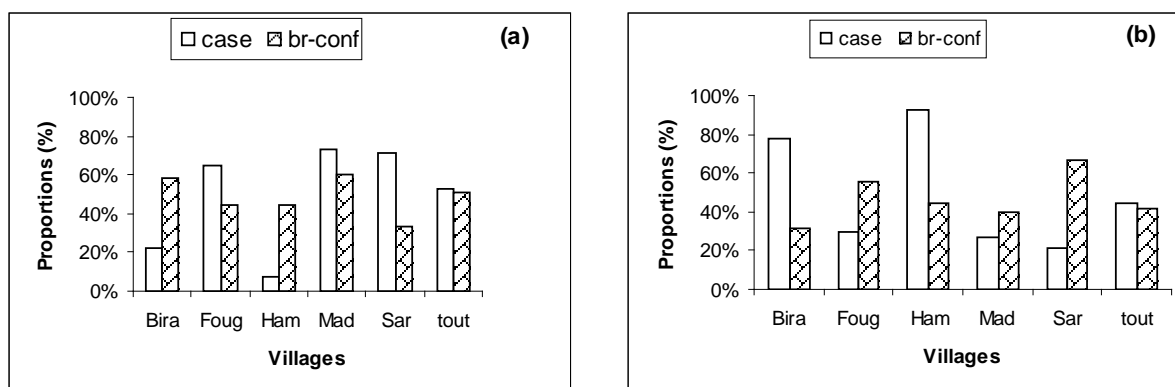


Figure 14: Proportion moyenne des différentes variétés par type de champ et par village : (a) variété de maïs jaune ; (b) variété de maïs blanc

Les deux variétés sont semées dans tous les villages (figure 14a et 14b). Le maïs blanc a été semé dans 43% des parcelles suivies, les jaunes dans 53%. Nous avons relevé aussi 4% des situations où il était impossible de distinguer s'il s'agissait de maïs blanc ou de jaune : on a désigné le maïs comme « mélange ».

En terme de pratique nous n'avons pas remarqué de différence : à savoir qu'aucune des variétés ne paraît être semée préférentiellement avant l'autre (figure 15), ni dans un type de champ particulier.

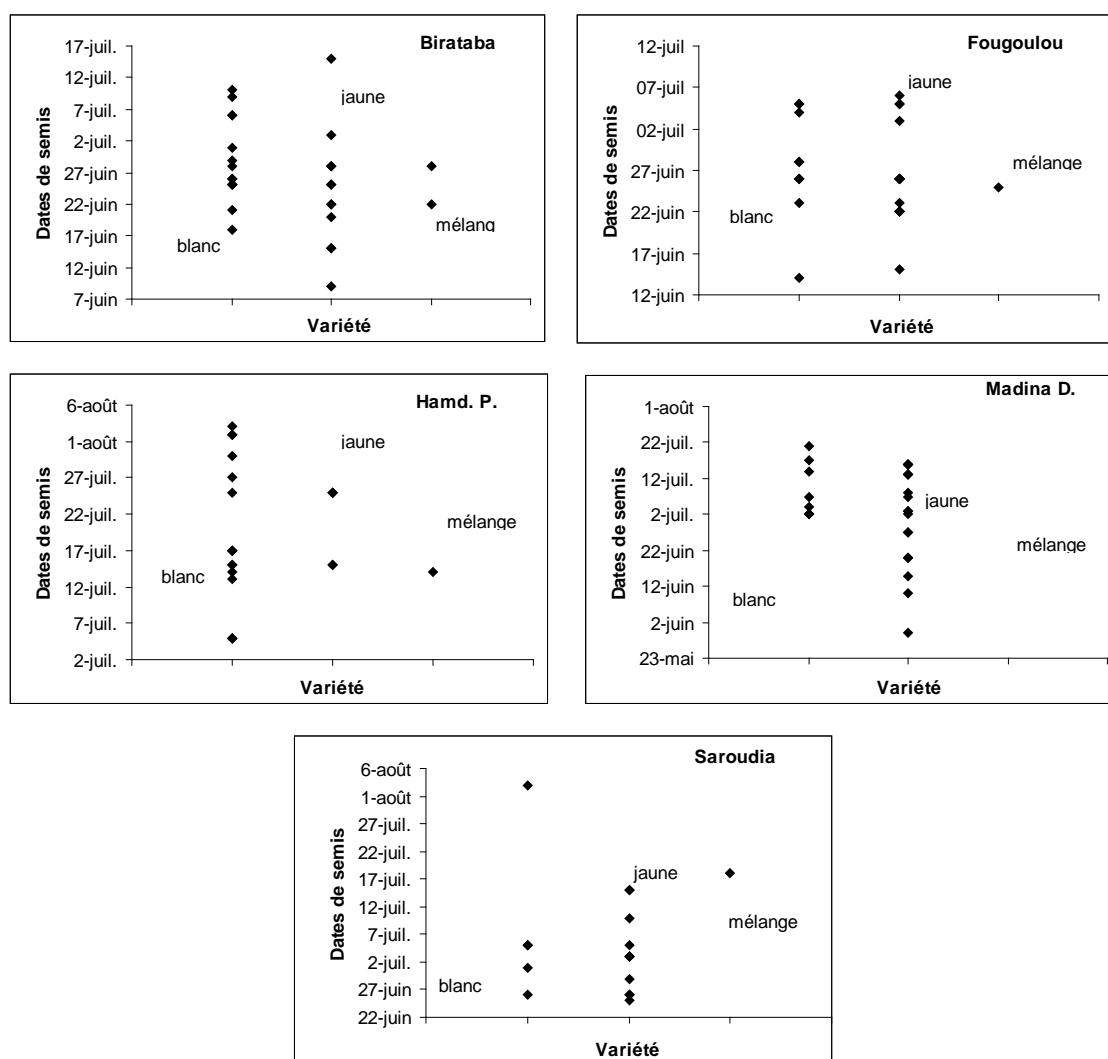


Figure 15 : Dates de semis en relation aux variétés dans les villages

Hamd. P. = Hamdallaye Pont ; Madina D. = Madina Diam

En terme de longueur de cycles nous avons pu constater de grandes différences pour une même « variété » (figure 16a et 16b), et de ce fait pas de différence a priori entre les blancs et les jaunes. Les cycles vont de 80 à 130 jours, soit de 2,5 à 4,5 mois.

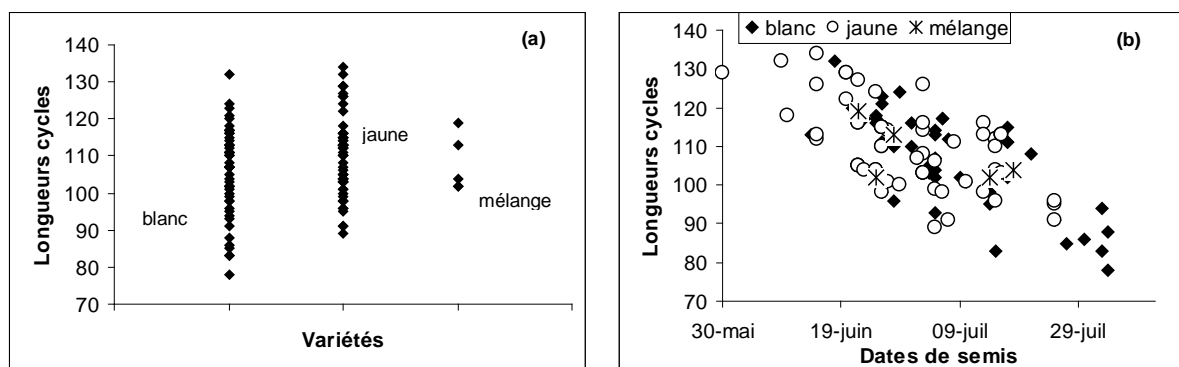


Figure 16 : Longueurs observées des cycles selon les variétés (a) et longueurs des cycles en relation aux dates de semis (b). Données de tous les villages

Enfin, si on regarde les rendements (cf tableau VII) on ne trouve pas non plus de réelle différence.

En fait nous nous sommes rendus compte en fin de stage qu'il y avait en réalité 2 variétés à grains jaunes : une à cycle court, de l'ordre de 3 mois, descendante du JDB ; et une autre à cycle long de 4 mois, plus traditionnelle.

Les résultats obtenus ne montrent pas une distinction nette entre variétés en terme de longueur de cycle et gestion par le paysan.

III.1.3 Gestion de la fertilité

3.1.3.1 Rotations et précédents cultureaux

Plusieurs types de systèmes ont été notés dans les parcelles suivies. La succession culturale maïs sur maïs est la plus fréquente (figure 17a). Les rotations sont diverses, mais nous avons présenté celles qui font intervenir la présence de coton (figure 17b) et la présence d'arachide (figure 17c) dans les trois dernières années. La rotation avec présence de coton est plus fréquente que la rotation avec présence d'arachide. Une répétition du maïs plusieurs années (au moins cinq ans) de suite sur la même parcelle a été relevée.

Dans notre échantillon, le précédent cultural maïs est le plus important et représente 70%. Les autres précédents sont le coton, l'arachide, le sorgho, le mil « sanio » et la jachère. Les figures 18a à 18e représentent les proportions de précédent cultural par type de champ et par village.

L'importance de la fréquence du précédent maïs dans les champs de case par rapport aux champs de brousse et confins est constatée dans tous les villages.

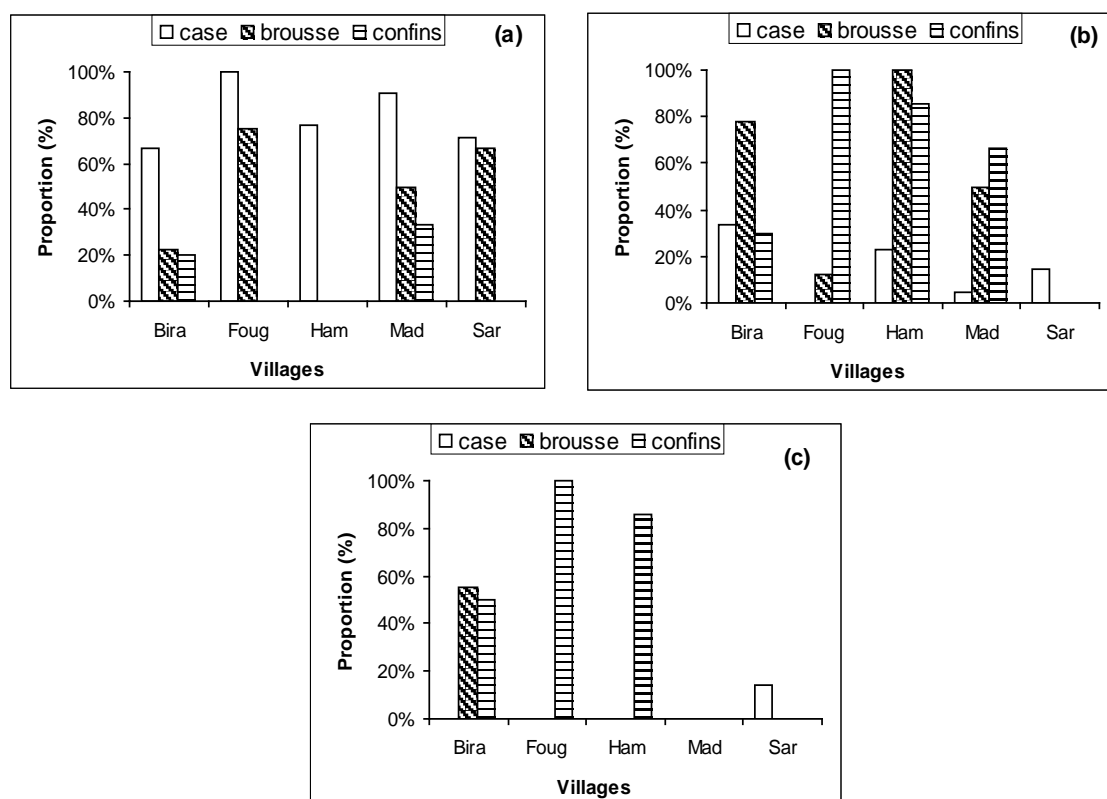


Figure 17: Proportion moyenne des différents types de rotation de culture par type de champ et par village : (a) rotation maïs-maïs-maïs (MMM) ; (b) rotation avec présence de coton ; (c) rotation avec présence d'arachide

Dans les champs de case on remarque que la monoculture du maïs est largement dominante tandis que dans les champs de brousse et confins la rotation est marquée par la présence de coton ou d'arachide.

3.1.3.2 Amendements organiques : parcsages et fumiers

Parcsages :

Le parcsage est le séjour d'ovins et/ou de caprins dans une parcelle, dans le but de fertiliser le sol avec leurs déjections.

Dans 40% des parcelles suivies, le parcsage nocturne a été pratiqué. Le nombre de parcelles parquées est très variable par village. La durée et l'intensité de parcsage sont très variables aussi.

Dans tous les villages, le parcsage a été observé dans les champs de case (figure 19a). Dans les champs confins, il n'a été relevé qu'à Birataba (10%).

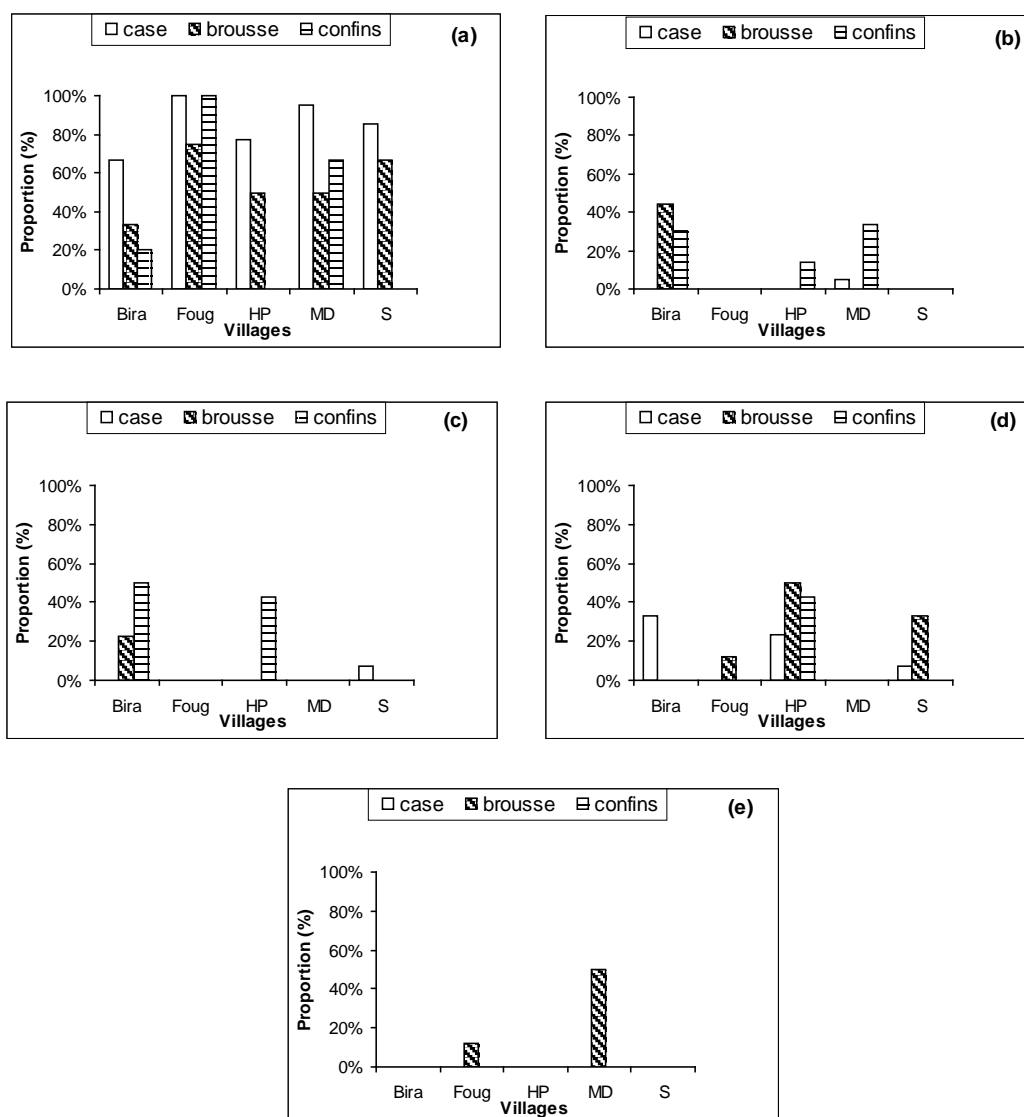


Figure 18: Proportion moyenne du précédent cultural direct par village et par type de champ : (a) précédent maïs ; (b) précédent coton ; (c) précédent arachide ; (d) précédent autre céréale (sorgho ou mil sanio) ; (e) précédent jachère

Fumier :

Le fumier est une litière de bêtes mêlée de leurs excréments qu'on laisse fermenter et que l'on utilise pour fertiliser les terres.

L'épandage de fumier d'équidés a lieu le plus souvent avant le semis. Le choix du champ et des endroits à fumer dépend de l'appréciation de l'agriculteur sur le niveau de fertilité de sa parcelle. L'utilisation du fumier est très faible (11%) dans notre échantillon. Elle n'a été observée que dans les villages de Madina Diam (seulement dans les champs de case) et de Hamdallaye Pont (dans les champs de case et dans les champs confins) (figure 19b) qui se situent plus au Nord de la zone d'étude.

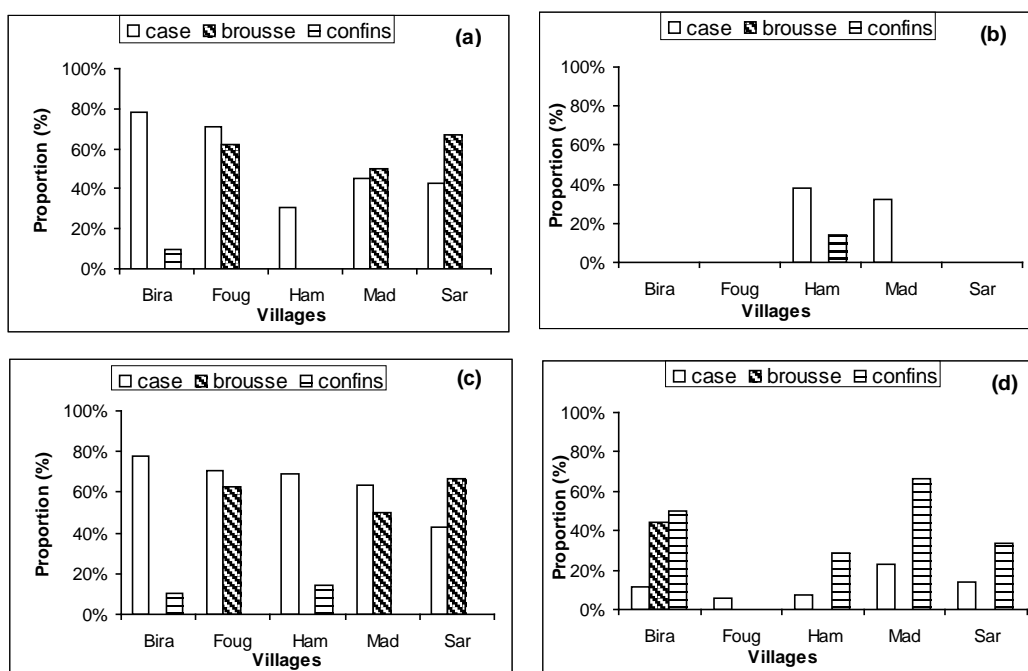


Figure 19: Proportion moyenne des différents types de fertilisation par type de champ et par village : (a) parcage 2006 ; (b) fumier 2006 ; (c) matière organique 2006 ; (d) engrais 2006

3.1.3.3 Amendements minéraux : engrais

19% des agriculteurs de notre échantillon ont utilisé de l'engrais NPK et 5% ont utilisé de l'engrais azoté (urée). Parmi ceux qui ont utilisé l'engrais, 9% ont fertilisé leurs parcelles par du NPK et de l'urée. L'utilisation de l'engrais varie en fonction des villages. L'engrais a été le plus utilisé dans les champs confins (figure 19d). Les doses utilisées sont en général inférieures à 100 kg/ha. Ces dernières restent imprécises puisqu'elles s'évaluent de façon approximative. La date d'apport a été variable entre 18 jours après semis et 52 jours après semis.

3.1.3.4 Synthèse

La fertilisation organique (parcage et épandage de fumier) est plus importante que la fertilisation minérale (figures 19c et 19d) dans tous les villages de la zone étudiée. La matière organique est plus utilisée dans les champs de case et brousse tandis que l'engrais est plus utilisé dans les champs confins.

III.1.4 Préparation du sol

Dans 98% des parcelles le nettoyage sur brûlis a été pratiqué un à deux mois avant les semis. La deuxième étape qui suit le nettoyage sur brûlis est soit un labour, soit un grattage. Ces derniers représentent plus de 99% des cas de notre échantillon. Le semis direct n'est pratiqué que dans moins de 1% des parcelles enquêtées.

Les proportions moyennes de travail du sol (labour et grattage) sont représentées aux figures 20a et 20b. Le labour a été le plus utilisé (85%) de l'échantillon total. Le labour et le grattage des champs sont pratiqués après les premières pluies mais avant les semis. Un travail manuel du sol (0,8%) a été noté.

Le labour se fait avec une charrue (Photo 2) tractée soit par des bœufs dans la plupart des cas, soit par un cheval. La profondeur du labour varie entre 12 à 18 cm. Le grattage se fait avec la houe à sine (Photo 3) tractée soit par un cheval soit par un âne. La profondeur du grattage est inférieure à 10 cm.

III.1.5 Semis : densités, modalités et périodes

3.1.5.1 Modalités et densités de semis

Les semis sont quasiment tous exécutés à l'aide d'un semoir (93%). Les semis manuels (7%) sont l'exception et se rencontrent dans certains petits champs de case.

Les mesures de densités réalisées ont montré certaines constantes : le maïs est semé en ligne avec un écartement moyen entre lignes de 70 à 75 cm. Dans tous les villages enquêtés, le disque utilisé dans les semoirs est de 16 trous, qui permet de semer avec un écartement d'environ 8-10 cm sur la ligne. Cela donne une densité de semis très importante de l'ordre de 130000 à 170000 pieds à l'Ha. En effet les paysans pratiquent le démariage (4% des parcelles suivies). Nous avons noté 15% de resemis de toutes les parcelles suivies. Ceci est dû à une mauvaise qualité de la levée

Mais en fait on a pu observer de très grandes hétérogénéités : des portions de lignes avec des densités beaucoup plus élevées au départ (des grains tous les 5-6 cm), des zones avec des écartements importants. Cela indique une mauvaise maîtrise des semis.

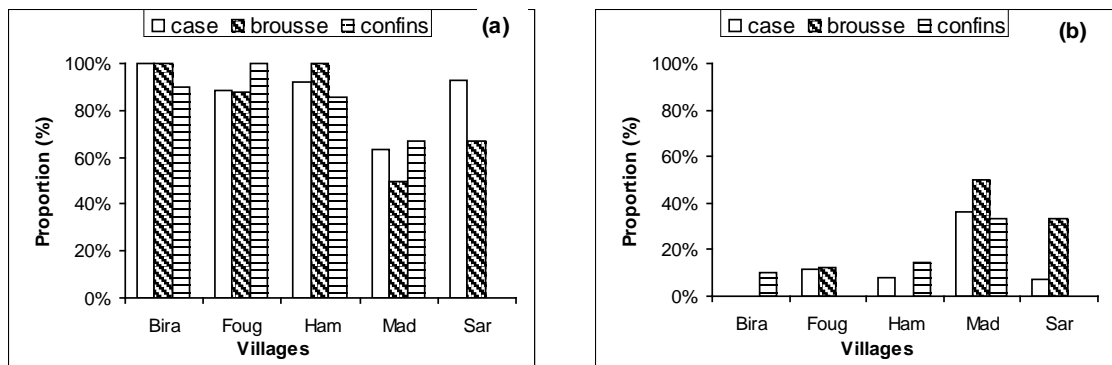


Figure 20: Proportion moyenne des différents types de travail du sol par type de champ et par village : (a) labour ; (b) grattage

Dans les parcelles enquêtées, les densités de population mesurées au cours du cycle varient entre 19919 plantes/ha à 78535 plantes/ha et la densité moyenne est égale à 34810 plantes/ha. En fin de cycle la densité moyenne trouvée est de 30224 plantes/ha.

3.1.5.2 Périodes de semis

Ces semis se répartissent sur trois mois (juin, juillet et août). Il y en a même quelques uns fin mai. La majorité a lieu entre le 20 juin et le 20 juillet (figure 21 et annexe 8). En fait dans chaque village cela dépend avant tout des pluies. Dans la figure 9 les périodes des semis de chaque village ont été superposées sur les représentations graphiques des pluviométries décadaires. On note que dans chaque village les semis s'étalent sur au moins un mois. C'est un facteur qui a compliqué énormément notre étude.

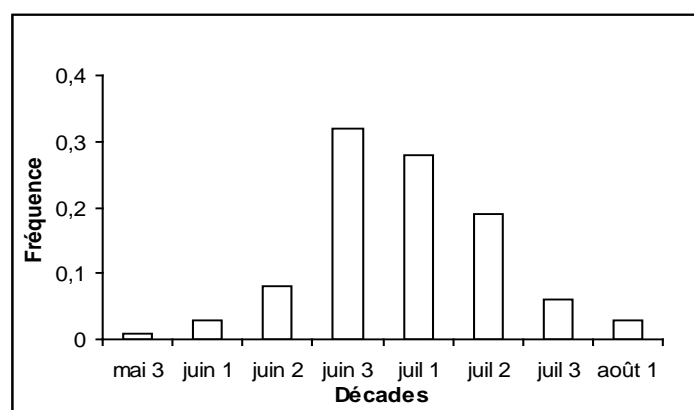


Figure 21: Fréquence des différentes dates de semis exprimées en jours calendaires

III.1.6 Gestion de l'enherbement

3.1.6.1 Sarclages

Une majorité des agriculteurs (84%) pratiquent deux interventions par cycle de culture. Le restant se répartit entre ceux qui réalisent davantage (3 ou 4 désherbages). Les informations sur le nombre et la date exacts des désherbages n'ont cependant pas été toutes notées. Le sarclage mécanique pratiqué avec la houe asine (cf. photo 3) est majoritaire. Les binettes sont réglables en fonction de l'écartement entre les lignes. Un sarclage manuel sur les lignes complète souvent le premier sarclage à la houe asine.

3.1.6.2 Utilisation d'herbicides

Dans la zone d'étude, l'enherbement a été contrôlé aussi par l'utilisation d'herbicide (21% des parcelles). L'atrazine a été l'herbicide le plus utilisé pour le contrôle des adventices. Les proportions moyennes d'utilisation d'herbicide par type de champ et par village sont représentées dans la (figure 22). Le traitement avec de l'herbicide a été plus important dans les villages de Fougoulou et de Birataba. Ces deux villages se trouvent plus au sud de la zone enquêtée et ont obtenu des cumuls de pluviométrie supérieurs aux autres villages. Seul l'herbicide de pré-émergence ou de pré-levée a été utilisé dans toutes les parcelles traitées. Le traitement a été effectué avant ou juste après le semis et il a pour but de désherber l'ensemble des adventices avant la levée du maïs. L'herbicide sélectif du coton a été le plus utilisé (75% des cas) et l'herbicide sélectif du maïs dans 25% des cas.

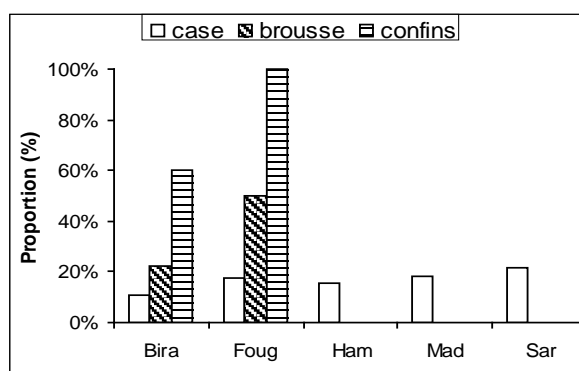


Figure 22 : Proportion moyenne d'utilisation d'herbicide par type de champ et par village

3.1.6.3 Présence de striga

La présence de striga a été notée (10% des cas) mais en faible densité. Le striga s'observait en général dans les champs confins, mais aussi dans les parcelles où l'enherbement n'était pas très fort.

III.1.7 Associations culturelles

Le maïs est cultivé seul ou associé avec d'autres cultures secondaires.

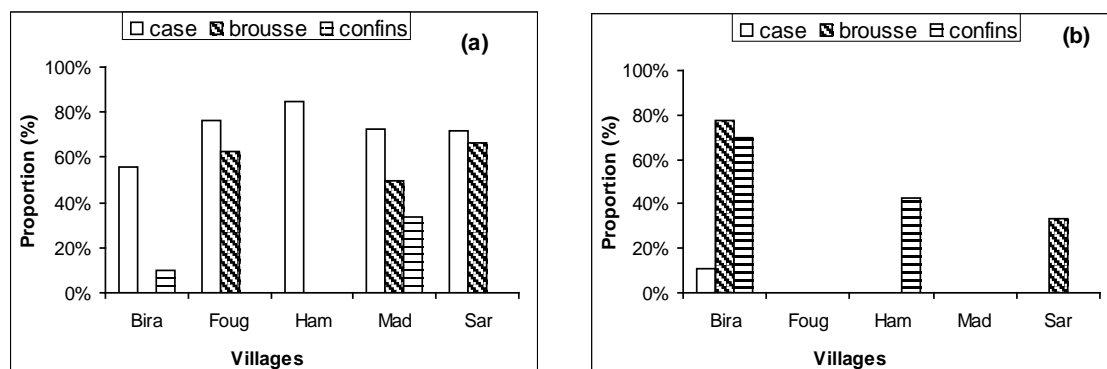


Figure 23: Proportion moyenne des différents types d'associations culturelles par type de champ et par village : (a) maïs-courge ; (b) maïs niébé

Les situations de mono-culture représentent 28% des cas. Les associations retrouvées dans l'échantillon de la zone enquêtée sont principalement l'association maïs-courge et l'association maïs-niébé. La figure 23 récapitule les proportions moyennes d'association par type de champ et par village. L'association maïs-courge se rencontre le plus souvent dans les champs de case.

III.1.8 Corrélations entre type de champs et aspects de la gestion

Dans cette partie, nous étudierons la liaison éventuelle entre type de champs et les aspects de la gestion et de la fertilité. Pour cela, il est utilisé une analyse des correspondances multiples (acm) qui vise à mettre en évidence les relations entre les modalités et les différentes variables. Deux modalités de deux variables seront d'autant plus liées qu'elles sont proches.

Nous avons regroupé les variables brousse et confins (brousse_confins) pour l'analyse des correspondances multiples. Nous allons procéder à analyser d'abord les corrélations entre les deux types de champs (case et brousse_confins) avec les variables de gestion de la fertilité, ensuite les deux types de champs aux variables aspects de la gestion et du sol.

Dans la figure 24, les variables fertilité et les variables précédent et rotation sont corrélées avec les types de champs. Les variables précédent maïs, rotation maïs-maïs maïs (MMM) et

fertilisation organique sont plus corrélées avec les champs de case. Les variables fertilisation minérale, faible fertilisation organique et autre rotation sont plus corrélées aux champs de brousse et confins.

La gestion de la fertilité des années précédentes est comparable à celle de l'année 2006 parce que les champs de brousse et confins sont caractérisés par l'utilisation d'engrais toutes les années (tous_ans_engrais), des apports irréguliers et la non utilisation de matière organique.

La figure 25 explique les relations qui existent entre variables de gestion non relatives à la fertilité et les rotations. L'herbicide est la variable la plus corrélée aux champs de brousse et confins. Certaines variables sont corrélées à la fois à tous les types de champs. C'est le cas de sarclage2 et de la variable association.

La corrélation des variables aspect de la gestion et du sol avec les types de champs n'est pas assez nette par rapport à la corrélation des types de champs avec la fertilité et des rotations. En résumé, ces remarques confirment globalement la plupart des résultats des analyses simples présentées précédemment.

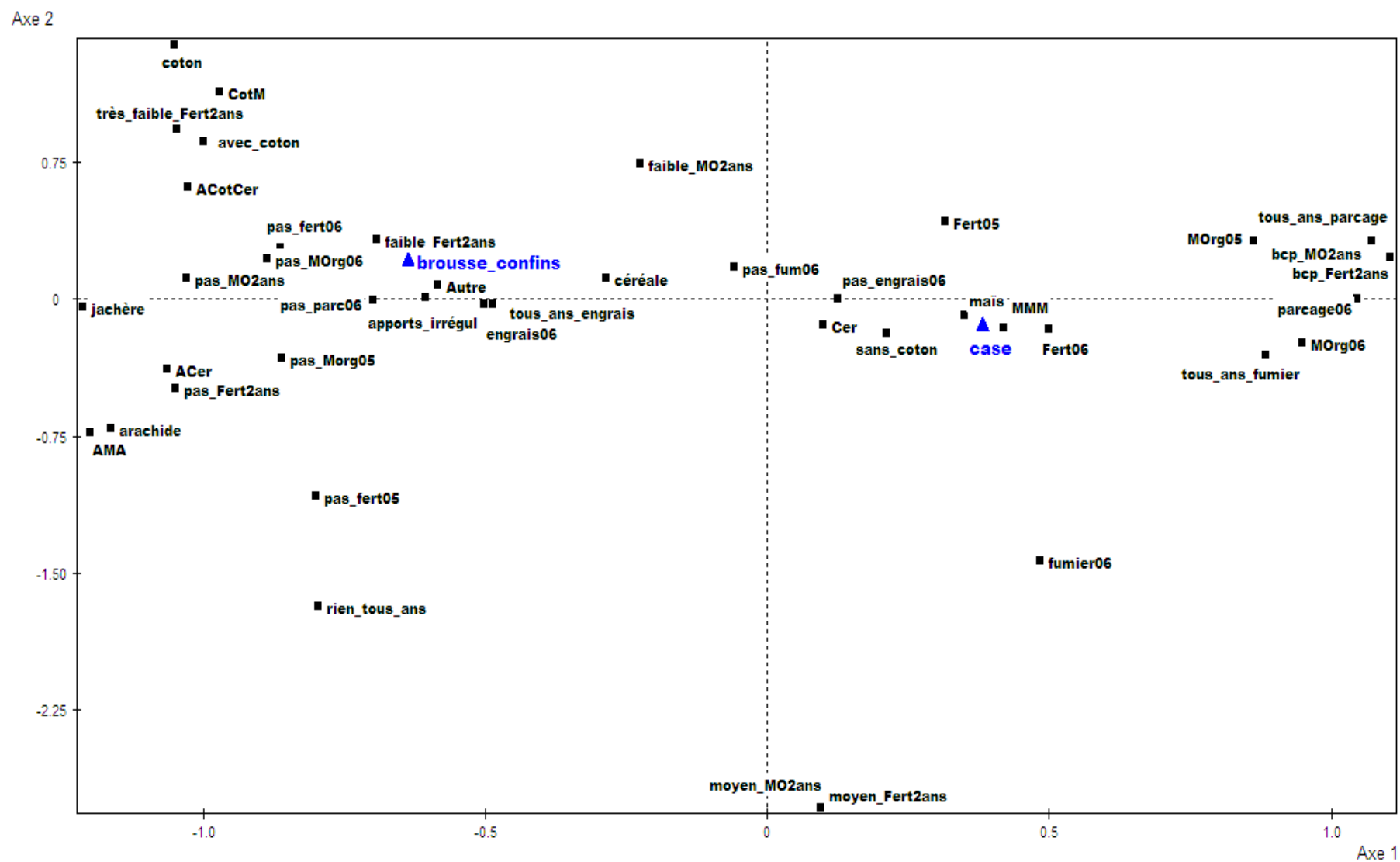


Figure 24 : Corrélations entre deux types de champs et les variables de gestion de la fertilité, précédent et rotation

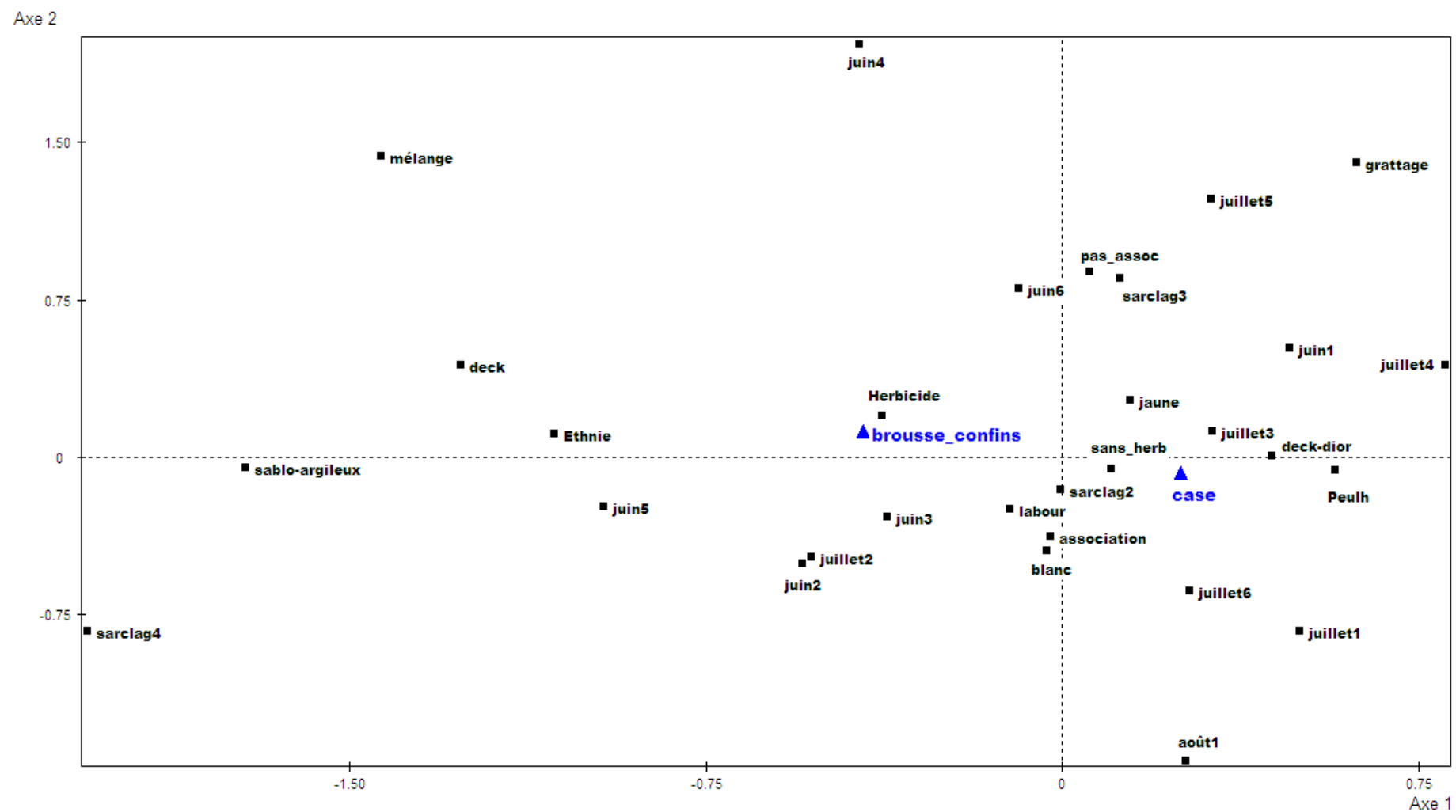


Figure 25 : Corrélations entre les deux types de champs et aspects de la gestion et du sol

III.2 ETUDES DES RENDEMENTS

III.2.1 Variabilité des rendements

Les résultats de rendements sont donnés au tableau VI et aux figures 26a et 26b.

Tableau VI : Paramètres statistiques à l'échelle des villages des données de rendements

	Tous les rendements (Kg/Ha)								
	Nbr	Moy	Ec.type	CV%	Min	Max	Méd.	Quart.1	Quart.3
Birataba	28	1615	851	53%	0 (1 parc.)	3237	1529	979	2275
Fougoulou	26	1676	616	37%	949	2976	1524	1099	2138
Hamdalaye	22	1180	827	70%	0 (4 parc.)	2710	1340	378	1814
Madina Diam	27	2417	1082	45%	0 (2 parc.)	4307	2734	2094	3065
Saroudia	17	1936	948	49%	0 (1 parc.)	3421	2107	1220	2440
	Rendements non nuls (Kg/Ha)								
	Nbr	Moy	Ecartype	CV%	Min	Max	Méd.	Quart.1	Quart.3
Birataba	27	1675	805	48%	297	3237	1562	1049	2311
Fougoulou	26	1676	616	37%	949	2976	1524	1099	2138
Hamdalaye	18	1442	668	46%	148	2710	1418	1069	1904
Madina Diam	25	2610	862	33%	579	4307	2859	2238	3090
Saroudia	16	2058	833	40%	573	3421	2113	1335	2566

Nbr = nombre ; Moy = moyenne ; Ec. Type = écartype ; CV = coefficient de variation ; Quart. = quartile ; Min = minimum ; Max = maximum ; Méd. = médiane.

La variabilité des rendements au sein d'un même village est très importante, avec des rendements pouvant aller de 0 (parcelles abandonnées en cours de cycle, du fait de l'enherbement) ou 200-300 Kg/Ha à plus de 3,5 Tonnes/Ha.

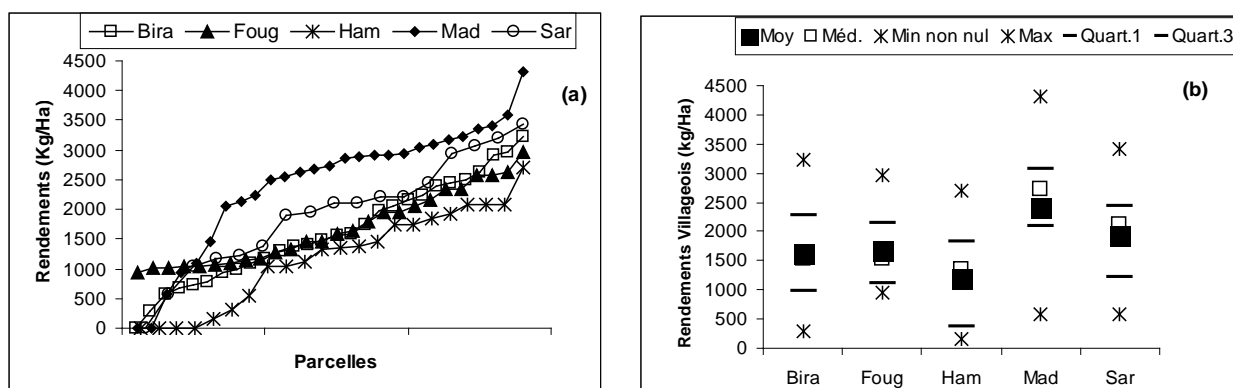


Figure 26 : Variabilité des rendements : (a) indicateurs statistiques par village ; (b) rendements des parcelles rangés par ordre croissant dans chaque village

On a des gammes de rendements très étendues et globalement équivalentes pour les différents villages. Deux villages se distinguent du lot : Hamdalaye Pont, qui a les plus mauvais rendements, et Madina Diam, qui a les plus élevés. En fait Madina Diam a 85% de champs de case (cf tableau IV) et Hamdalaye Pont en a 59%. A noter que ce sont pourtant deux villages voisins d'environ 5 Km et aux caractéristiques en apparence identiques.

La variabilité est également importante au sein de chaque parcelle, comme l'illustre la figure 27 qui décrit les rendements obtenus à Birataba.

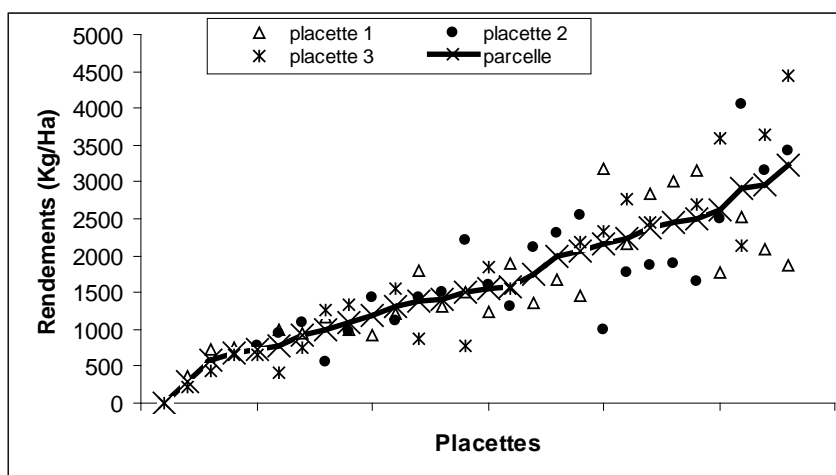


Figure 27 : Variabilité intra-parcellaire des rendements obtenus à Birataba

On observe logiquement que la variabilité intra-parcellaire augmente avec le niveau « moyen » de rendement de la parcelle. En même temps on constate aussi que les valeurs minimales et maximales augmentent avec le niveau de rendement. Cela conforte bien que l'on peut parler d'un niveau « moyen » de rendement pour une parcelle, même si ce niveau cache une certaine hétérogénéité.

Tableau VII : Variabilité de production selon la variété

Rendement	Blanc	Jaune	Mélange
MIN Rendt Kg/Ha	297	322	148
MOYENNE Rendt Kg/Ha	1960	1890	1410
MAX Rendt Kg/Ha	4307	3596	2239
Nombre	53	62	5

Max = maximum ; Min = minimum

La forte variabilité observée globalement sur le rendement, se retrouve également dans les variétés. La variété de maïs blanc a les rendements les plus élevés (tableau VII) mais a un minimum de rendement faible comparé au jaune. Le mélange plafonne à des niveaux de production moindre.

III.2.2 Composantes des rendements

Nos mesures nous ont finalement permis de déterminer les composantes suivantes :

1. densité (nombre de pieds présents) à récolte (pieds/Ha) ;
2. nombre d'épis fertile (avec grains) par pieds (épis/pied) ;
3. poids de grains par épis (g/épis) ;
4. et, par combinaison de 2 et 3, poids de grains par pied (g/pied).

La densité à la récolte est une composante dont on peut dire qu'elle a pu être affectée par beaucoup de choses tout au long du cycle (densité et qualité du semis, maladies et stress, verse, accidents, etc.) sachant qu'elle est bornée dès le départ au moment du semis.

Le nombre d'épis fertiles dépend des conditions générales et surtout hydriques lors, d'une part de la période de développement embryonnaire des organes reproducteurs (« phase reproductrice »), et surtout lors de la période de « floraison-pollinisation » qui est la période critique pour le maïs.

Le poids de grains par épis intègre en fait deux composantes : le nombre de grains par épis et le poids moyen des grains. Nous n'avons malheureusement pas pu déterminer séparément ces deux composantes. Le nombre de grains par épis est déterminé lors des mêmes périodes que le nombre d'épis fertiles : « phase reproductrice » et « floraison-pollinisation ». Le poids moyen des grains est déterminé lors de la phase de remplissage du grain, qui suit la pollinisation. Le poids de grains par épis peut donc être influencé par tous les stress, dont surtout hydriques, survenant de la phase reproductrice à la fin du remplissage du grain. Mais on peut faire l'hypothèse que c'est surtout la phase de remplissage qui est déterminante.

Le poids de grains par pied est déterminé au cours des mêmes périodes.

La tableau VIII donne les niveaux de corrélation (valeurs des R^2 et sens de la corrélation) entre les différentes variables de rendement. Les valeurs des R^2 ont été établies au moyen de régressions linéaires. Les figures 28a à 28d et 29a et 29b présentent ces corrélations pour le village de Fougoulou.

Tableau VIII : Valeurs des R^2 des corrélations entre variables de rendement. Les R^2 donnés en gras indiquent que la corrélation est négative

var. expliquée	var. explicative	Tout	Bira	Foug	HP	MD	Sar
Rendt	dens.	0.10	0.19	0.01	0.17	0.27	0.20
Rendt	épis/pied	0.33	0.19	0.27	0.68	0.05	0.50
Rendt	grains/épis	0.40	0.50	0.48	0.63	0.29	0.42
Rendt	grains/pied	0.59	0.70	0.53	0.66	0.35	0.58
épis/pied	dens.	0.00	0.06	0.18	0.01	0.08	0.01
grains/épis	dens.	0.07	0.07	0.29	0.03	0.03	0.09
grains/pied	dens.	0.07	0.12	0.31	0.03	0.10	0.04
grains/épis	épis/pied	0.04	0.00	0.18	0.58	0.00	0.20

Bira =Birataba ; Foug = Fougoulou ; HP = Hamdallaye Pont; MD = Madina Diam; Sar = Saroudia; var. = variable.

Il apparaît que le niveau de rendement est essentiellement lié au nombre d'épis par pied et au poids de grains par épis. Il est en général peu lié à la densité ($R^2 < 0.2$). Madina Diam se distingue des autres villages avec des tendances différentes.

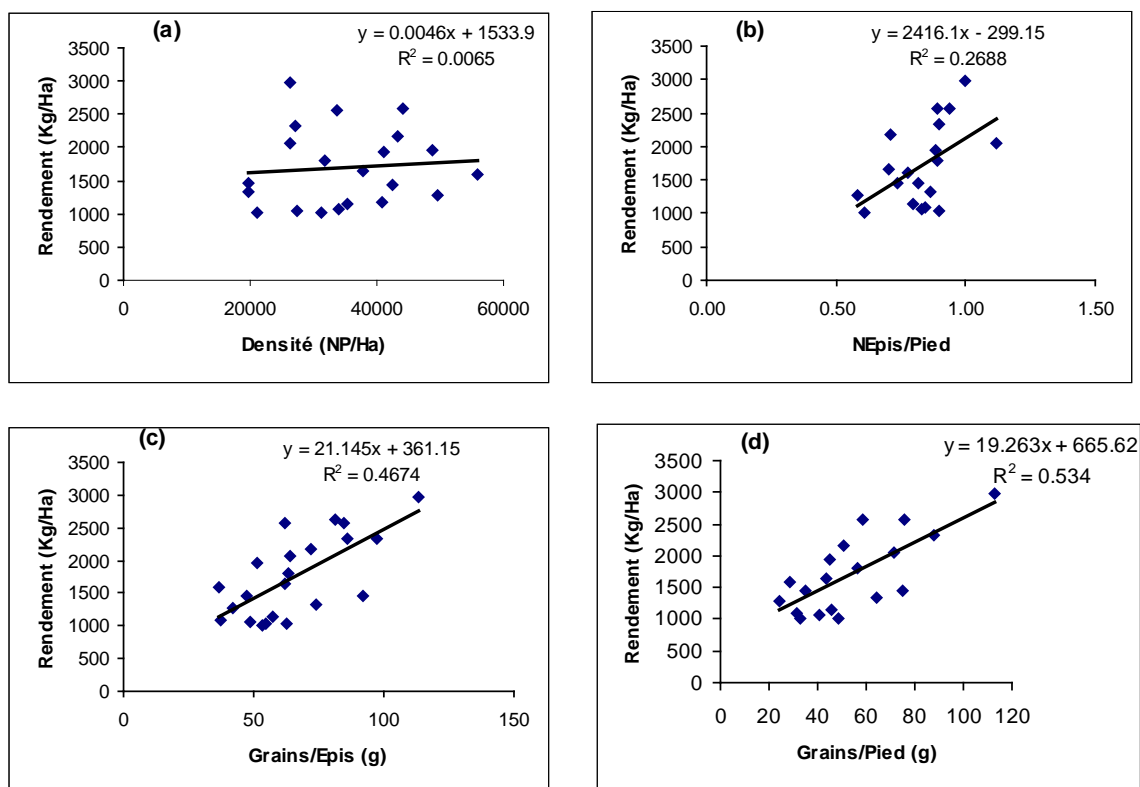


Figure 28 : Corrélations entre le rendement avec la densité (a), le nombre d'épis par pied (NEpis/Pied) (b), le poids des grains par épis (c) et le poids des grains par pied (d) à Fougoulou

Le nombre d'épis par pied apparaît globalement indépendant de la densité, mais des corrélations peuvent exister dans un sens ou dans l'autre. C'est globalement logique puisqu'il est déterminé essentiellement par la qualité de la pollinisation.

On constate par ailleurs que le poids de grains par épis, et par pied, est globalement légèrement corrélé négativement (va en diminuant) avec la densité. Cela peut traduire un petit effet de compétition. Mais les corrélations sont faibles.

Enfin le poids de grains par épis est également légèrement corrélé positivement au nombre d'épis par pied. Cette corrélation positive peut-être due au fait que le poids de grains par épis dépend en partie du nombre de grains et donc de la qualité de la pollinisation qui détermine aussi le nombre d'épis par pied.

On en retiendra que les rendements sont faiblement liés aux densités, et plutôt moyennement liés au nombre d'épis fertiles par pied et au poids de grains par épis.

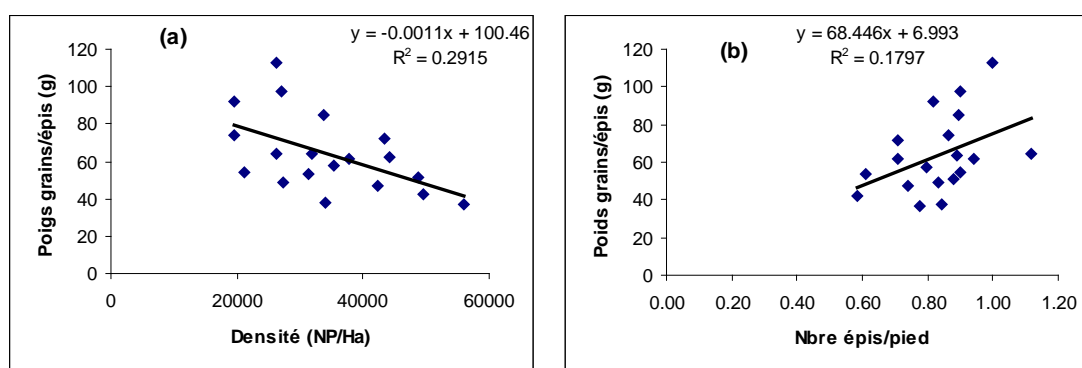


Figure 29 : Corrélations entre le poids des grains par pied avec la densité (a) et le nombre d'épis par pied (Nbre épis/pied) (b) à Fougoulou

III.2.3 Rendements en relation à la gestion de la fertilité

Nous avons utilisé le logiciel Statistix 8.1 pour analyser les effets des modalités de gestion de la fertilité sur les rendements et leurs composantes.

Nous avons pris comme « blocs » les villages, et les variables utilisés pour l'analyse des données sont : le rendement (Rendt KG/Ha), le poids de grains par pied (G g/pied), le poids de grains par épi (G g/épis), le nombre d'épis productifs par pied (Eprod/pied) et la densité à la récolte (dens réc). Les facteurs étudiés lors des analyses sont : parcase en 2006 (ou non),

engrais en 2006 (ou non), matière organique en 2006 (matière organique = parcase + fumier) (ou non) et fertilisation en 2006 (fertilisation = matière organique + engrais) (ou non).

Statistix calcule les probabilités pour une liste de variables. Pour savoir si un facteur est significatif sur un certain nombre de variables, il faut que la valeur de la probabilité (P) soit inférieure ou égale à 5%. Si la probabilité est inférieure à 1% le facteur est très significatif sur la variable étudiée.

Nous avons présenté pour toutes les parcelles (tableaux IX à XII) les relations entre le rendement et ses composantes avec chaque facteur de fertilité. Les probabilités (P) sont les valeurs obtenues avec le logiciel Statistix.

Le rendement (tableau IX) des parcelles parquées est supérieur au rendement des parcelles non parquées. Les probabilités sont inférieures à 5% pour toutes les variables sauf la densité à la récolte. Le parcase a un effet significatif sur le rendement et le poids de grains par pied, et un effet très significatif sur le nombre d'épis et le poids de grains par épis.

Tableau IX : Impacts du parcase sur les rendements et leurs composantes : valeurs statistiques et probabilités de différences significatives

		Rendt Kg/Ha	dens réc	Eprod/pied	G g/epis	G g/pied
Parcase y compris parcelles avec autres fertilisations possibles	Nbr parcelle	48	42	41	45	42
	moyenne	2096	30016	0.90	83	79
	maximum	4307	57937	1.34	147	148
	minimum	949	12423	0.58	36	26
Pas de parcase mais autres fertilisations possibles	Nbr parcelle	64	60	59	62	60
	moyenne	1754	30369	0.80	71	56
	maximum	3596	54074	1.21	160	134
	minimum	148	12000	0.44	22	12
	P	0.0394	0.2778	0.0025	0.0000	0.0110
Parcase uniquement	Nbr parcelle	44	39	38	41	39
	moyenne	2105	29378	0.9	85	81
	maximum	4307	57937	1.3	147	148
	minimum	949	12423	0.7	36	26
Aucune fertilisation	Nbr parcelle	39	38	37	37	38
	moyenne	1627	29196	0.8	71	55
	maximum	3186	44240	1.1	160	122
	minimum	322	1200	0.4	26	14
	P	0.0156	0.6826	0.0018	0.0001	0.0154

L'apport d'engrais (tableau X) n'a pas d'impact significatif sur la production. Il semble cependant qu'il en ait un sur la densité, mais on peut se demander si ce n'est pas un effet du hasard ? Il faut aussi considérer que l'on a peu de parcelles fertilisées avec de l'engrais (21, dont uniquement 15 qui n'ont reçu que de l'engrais). Enfin d'une façon générale les agriculteurs mettent des quantités d'engrais très faibles.

Tableau X : Impacts de l'apport d'engrais sur les rendements et leurs composantes : valeurs statistiques et probabilités de différences significatives

		Rendt Kg/Ha	dens réc	Eprod/pied	G g/epis	G g/pied
Engrais y compris parcelles avec autres fertilisations possibles	nombre	21	18	18	21	18
	moyenne	1911	34710	0.78	73	56
	maximum	3041	54074	1.21	150	91
	minimum	297	17831	0.51	22	12
Pas d'engrais mais autres fertilisations possibles	nombre	91	84	82	86	84
	moyenne	1899	29263	0.86	77	68
	maximum	4307	57937	1.34	160	148
	minimum	148	12000	0.44	26	12
	P	0.6013	0.0033	0.0916	0.0144	0.0479
Engrais uniquement	nombre	15	13	13	15	13
	moyenne	1780	32873	0.8	74	52
	maximum	2950	54074	1.2	150	82
	minimum	297	17831	0.5	22	12
Aucune fertilisation	nombre	39	38	37	37	38
	moyenne	1627	29196	0.8	71	55
	maximum	3186	44240	1.1	160	122
	minimum	322	1200	0.4	26	14
	P	0.4178	0.0427	0.6366	0.6134	0.6738

L'apport de matière organique (parcage et/ou fumier) a un effet significatif sur le rendement et ses composantes, à l'exception de la densité (tableau XI). Son effet sur le poids de grains par épis est même très significatif.

Tableau XI : Rendement et ses composantes en relation avec matière organique ou sans matière organique

		Rendt Kg/Ha	dens réc	Eprod/pied	G g/epis	G g/pied
Matière organique	Nbr parcelle	58	51	50	54	51
	moyenne	2117	30316	0.91	81	77
	maximum	4307	57937	1.34	147	148
	minimum	148	12000	0.50	33	12
Aucune fertilisation	Nbr parcelle	54	51	50	53	51
	moyenne	1670	30133	0.78	72	54
	maximum	3186	54074	1.21	160	122
	minimum	297	12000	0.44	22	12
	P	0.0072	0.9319	0.0037	0.0004	0.0423

Enfin on montre également un effet significatif de la fertilisation (tableau XII) sur les rendements et ses composantes, sauf pour la densité.

Tableau XII : Rendement et ses composantes en relation avec la fertilisation ou sans fertilisation

		Rendt Kg/Ha	dens réc	Eprod/pied	G g/epis	G g/pied
Fertilisation	Nbr parcelle	73	64	63	69	64
	moyenne	2048	30835	0.88	79	72
	maximum	4307	57937	1.34	150	148
	minimum	148	12000	0.50	22	12
Aucune fertilisation	Nbr parcelle	39	38	37	38	38
	moyenne	1627	29196	0.79	71	55
	maximum	3186	44240	1.14	160	122
	minimum	322	12000	0.44	26	14
	P	0.0168	0.4508	0.0203	0.0090	0.1683

III.2.4 Rendements en relation au type de champs

Les champs de case présentent des rendements plus élevés (tableau XIII; les parcelles abandonnées n'ont pas été considérées).

L'analyse avec Statistix montre des différences significatives entre les champs de case et les autres (brousse et confins ensemble) pour les variables « rendement », « épis productifs par pied » et « poids des grains par épi ». Ces résultats sont logiques vus les effets significatifs des modalités de gestion de la fertilité sur les variables de rendement et les différences de gestion entre les différents champs (cf figures 24 et 25).

Tableau XIII : Rendement et ses composantes en relation aux types de champs

		Rendt Kg/Ha	dens réc	Eprod/pied	G g/epis	G g/pied
Case	Nbr parcelle	72	65	64	68	65
	moyenne	2100	31070	0.90	78	72
	maximum	4307	57937	1.34	160	148
	minimum	322	12000	0.44	31	14
Brousse-confins	Nbr parcelle	40	37	36	39	37
	moyenne	1544	28739	0.75	73	55
	maximum	3237	51059	1.16	150	145
	minimum	148	12000	0.49	22	12
P		0.0094	0.5843	0.0119	0.0091	0.1343

III.2.5 Rendements en relation aux bilans hydriques estimés

Les bilans hydriques des parcelles ont été estimés par le biais de simulations réalisées par le logiciel SARRABIL. Les bilans ont été simulés au pas de temps journalier. Nous avons traité les valeurs journalières des degrés de satisfaction des besoins hydriques des cultures (ratios entre les consommations journalières simulées et les besoins simulés ; ETR/ETM). Ces valeurs journalières nous ont permis de déterminer deux indicateurs hydriques pour 4 périodes importantes des cycles. Les deux indicateurs sont : la valeur moyenne et la valeur minimale relevée des ratios ETR/ETM. Les périodes considérées sont celles au cours desquelles les composantes des rendements sont élaborées ou fortement influencées :

- la phase d'installation de la culture ;
- la période reproductrice ;
- la période floraison-pollinisation ;
- la période de remplissage des grains.

Ces périodes ont été positionnées en relation à la longueur du cycle. On sait cependant que nous avons certainement des erreurs sur les longueurs des cycles. Il faut donc rester prudent dans nos analyses et conclusions.

Une fois ces indicateurs établis par période pour chaque parcelle, nous les avons confrontés aux rendements et aux composantes des rendements. Nous avons également déterminé un indicateur composite, l'IRESP, dont différents auteurs ont montré qu'il était pertinent pour expliquer les rendements en relation au facteur hydrique (Forest et Reyniers, 1986 ; Cortier et al., 1988) :

$$\text{IRES P} = \text{ETR/ETM}_{\text{cycle}} \times \text{ETR/ETM}_{\text{floraison}} \times 100$$

Sur la base de différents essais agronomiques réalisés en stations expérimentales au Sénégal, Cortier et al. (1988) ont d'ailleurs établi la relation empirique suivante entre les valeurs d'IRESP et les rendements :

$$\text{Rendement} = 77 \times \text{IRES P} - 1200 \quad (\text{en kg/Ha}) \quad (R^2 = 0,9)$$

Vu que les rendements qui ont servi à établir cette relation ont été obtenus avec de bonnes conditions de travail du sol, de gestion de la fertilité et de gestion agronomique, nous pouvons les considérer a priori comme des « rendements potentiels ». La relation peut donc permettre, à partir des indicateurs hydriques, de déterminer des rendements potentiels.

On constate (figure 30) que l'ensemble des rendements est contenu par la « courbe enveloppe » constituée par les rendements potentiels déterminés à partir des IRESP. C'est logique.

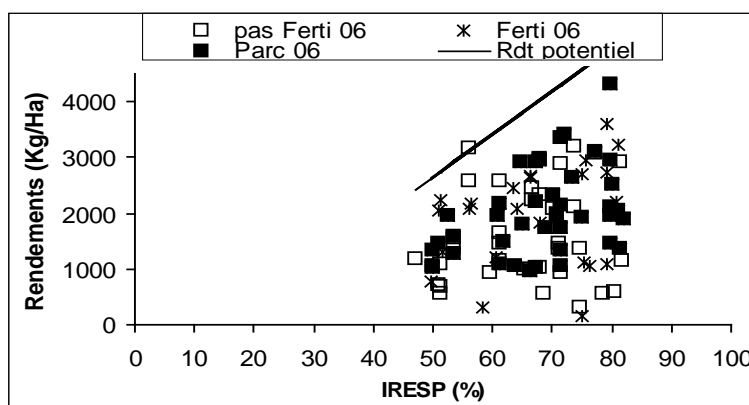


Figure 30 : Rendements mesurés en relation à l'IRESP et rendements potentiels estimés à partir de l'IRESP

Ferti 06 = fertilisation en 2006 ; parc 06 = parage en 2006 ; Rdt = rendement.

On note par ailleurs que l'on peut déterminer des tendances et tracer des « courbes enveloppe » (figure 31) en ce qui concerne les valeurs de nombre d'épis par pied en relation aux indicateurs hydriques considérés pour les périodes « phases reproductives » (Reprod) et

« floraisons » (Flor). Ainsi de façon générale les valeurs des meilleurs rendements diminuent en deçà de certains seuils de satisfaction moyenne ou satisfaction minimale sur les périodes considérées : ces seuils sont apparemment : 85%-90% pour la satisfaction moyenne sur la période « floraison », 80% pour la satisfaction moyenne sur la période « reproductive » et environ 50% pour les valeurs minimales sur ces deux périodes.

On peut également faire les mêmes observations en ce qui concerne le poids de grains par épis en relation aux indicateurs hydriques sur la période de remplissage des grains (Rgrains) : avec également un seuil de valeur moyenne de l'ordre de 80% et un seuil de valeur minimale de 60% environ.

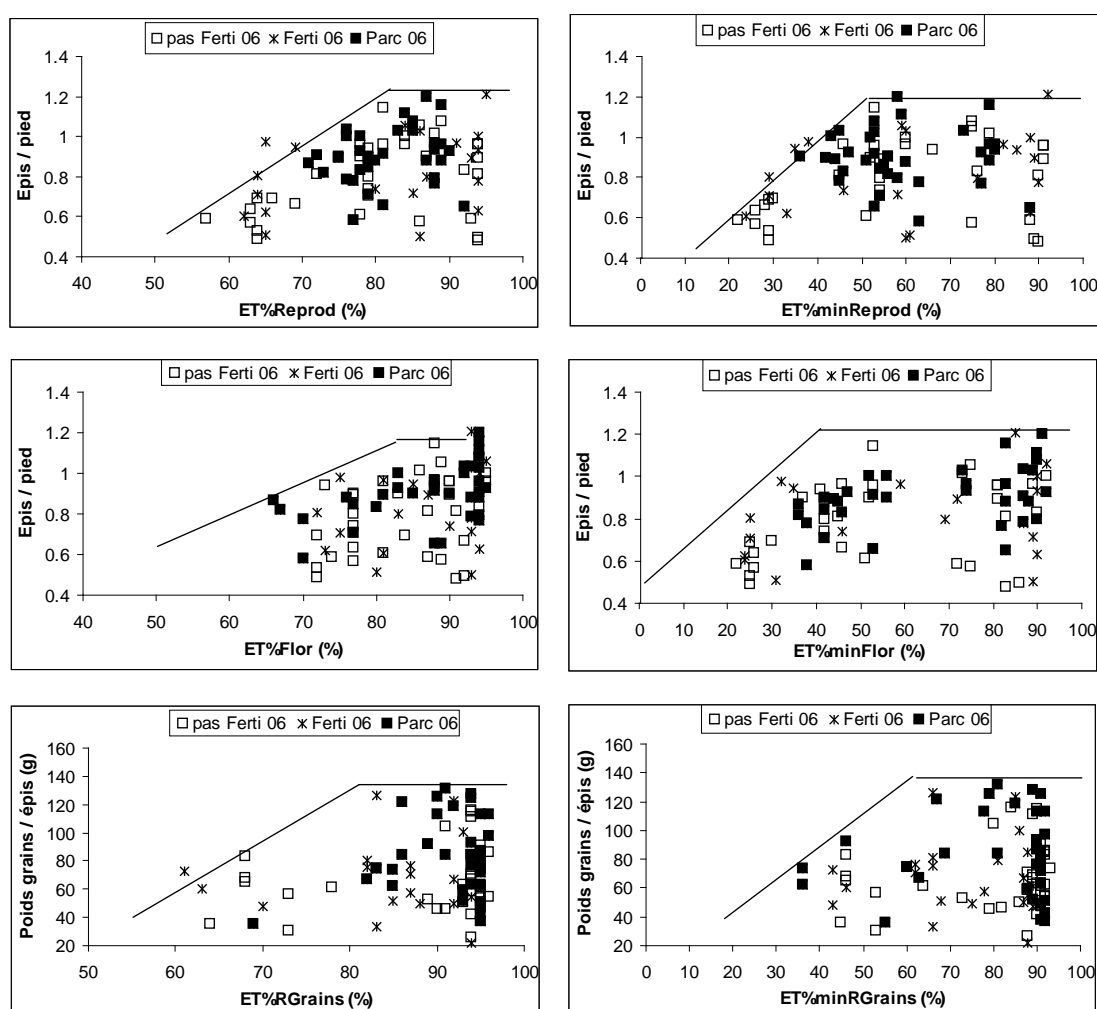


Figure 31 : Rendements, nombres d'épis par pied et poids de grains par épis en relation aux indicateurs de satisfaction des besoins hydriques

Ferti 06 = fertilisation en 2006 ; parc 06 = parcage en 2006 ; Rdt = rendement ;
ET% = satisfaction des besoins en eau ; min = minimale.

III.2.6 Rendements moyens en relation aux indicateurs hydriques

Nous avons essayé de voir s'il était possible de mettre en relation les rendements moyens villageois, ou des indicateurs statistiques des rendements à l'échelle des villages, tels que les rendements du quartile supérieur, avec des paramètres agroclimatiques, ceci dans le but de voir si on pouvait faire des prévisions.

La difficulté rencontrée est que les dates de semis sont très échelonnées au sein de chaque village (cf annexe 8). Cela pose un problème car les indicateurs que l'on peut potentiellement utiliser ne pourront pas facilement rendre compte de la variabilité agroclimatologique au sein de chaque village :

- si on prend des valeurs moyennes relatifs à toutes les parcelles ou une partie d'entre elles on aura des indicateurs qui vont moyenniser des situations très différentes ;
- si par contre on prend des indicateurs relatifs à une date particulière (la date moyenne ou médiane des semis par exemple), on aura des indicateurs qui ne seront représentatifs que de très peu de parcelle.

Nous avons pour chaque village simplifié la réalité en ne considérant que 3 parcelles :

- une parcelle semée à la date apparaissant comme le premier quartile (25%) des dates de semis du village, et de cycle égal à la valeur médiane des cycles ;
- une parcelle semée à la date apparaissant comme la médiane des dates de semis du village, et de cycle égal à la valeur médiane des cycles ;
- une parcelle semée à la date apparaissant comme le troisième quartile (75%) des dates de semis du village, et de cycle égal à la valeur médiane des cycles ;

Nous avons considéré leurs indicateurs hydriques, les IRESP, et les pluies sur leurs cycles. Ensuite nous avons fait la moyenne de ces valeurs. On peut donc considérer que ces valeurs sont des indicateurs des conditions hydriques de développement de la moitié « centrale » des parcelles, en écartant les parcelles les plus précoces et les plus tardives.

Ces valeurs ont été confrontées aux valeurs moyennes villageoises des rendements et aux indicateurs statistiques des rendements à l'échelle villageoise. Les résultats sont donnés aux figures 32.

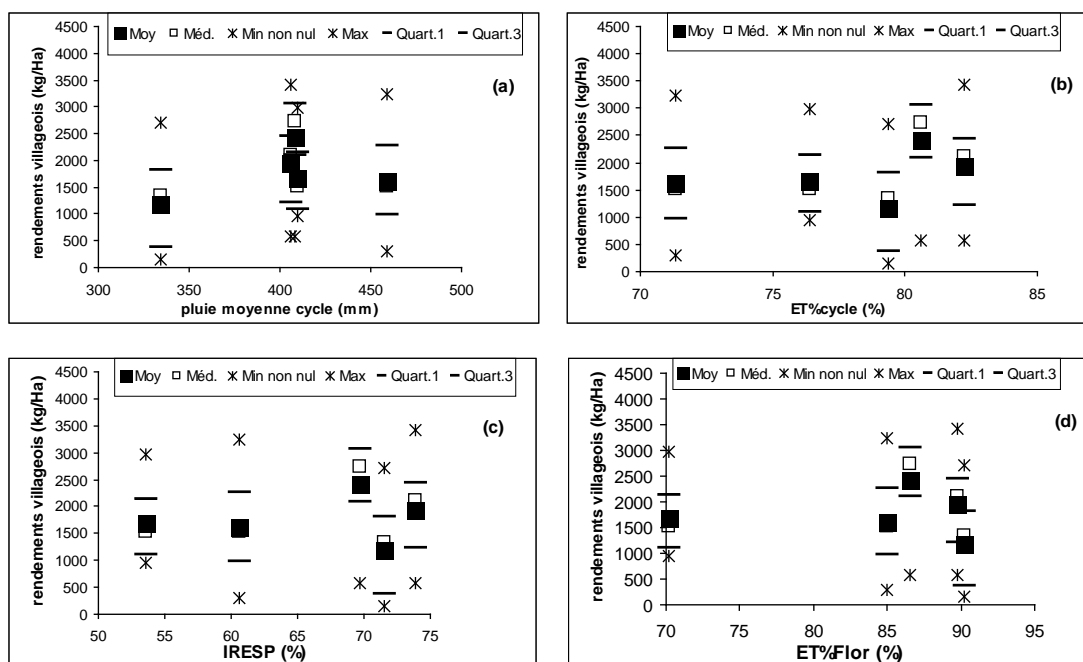


Figure 32 : Rendements villageois et caractéristiques statistiques des rendements villageois en relation aux valeurs moyennes (a) des pluies sur le cycle ; (b) des valeurs moyennes de satisfaction des besoins en eau sur le cycle (ET%cycle) ; (c) des IRESP ; (d) des valeurs moyennes de satisfaction des besoins en eau sur la période floraison (ET%Flor)

Aucune tendance claire n'est à souligner. On note en particulier que l'indicateur « pluie moyenne sur le cycle » ne serait pas du tout un bon indicateur pour faire de la prévision. L'IRESP et les taux de satisfaction des besoins en eau ne semblent pas non plus pouvoir permettre de réaliser des prévisions.

DISCUSSION

1. Le maïs est cultivé essentiellement dans la zone étudiée pour l'alimentation humaine : c'est la principale ressource vivrière. Les variétés semées sont dans la plupart des cas des variétés locales : une variété de maïs blanc le Synthétic C et deux variétés de maïs jaune. La variété jaune à cycle long de 4 mois, qu'ils appellent « traditionnelle » n'est plus semée par tout le monde en raison, d'après les paysans, de la longueur de son cycle et des évolutions de la saison des pluies qui font qu'elle est devenue risquée. Pourtant ils préfèrent son goût. On a donc 3 variétés « locales ». Nous n'avons pu faire la différence durant le stage entre les 2 variétés jaunes.

Des différences sur la durée des cycles pour une même « variété » ont été constatées. Mais cependant il y a peut-être des erreurs importantes sur les longueurs réelles des cycles (durée semis - maturité) : en effet ce que l'on a comme information est une date de récolte avant toute chose. Or la date de récolte est également conditionnée par les pluies et la disponibilité du paysan. Nous pouvons penser qu'elle est en général postérieure à la date réelle de maturité.

Par ailleurs en ce qui concerne les jaunes il est assez logique de noter que l'on a une grande variabilité des cycles puisque en réalité il y a sans doute deux types de jaune. Pour les blancs c'est plus surprenant. D'après nos données plus le semis est tardif, plus le cycle est court. Cela peut laisser penser que les variétés sont photopériodiques.

On en retiendra qu'il ne nous est pas possible de caractériser vraiment les variétés et leurs cycles avec les informations dont nous disposons. Pour les années suivantes il faudra lors des prochains hivernages être plus vigilant sur le type de variété (couleur, origine et longueur de cycle) et sur les dates clés des cycles : floraison et maturité physiologique en particulier.

2. Nous avons pu distinguer deux types de parcelles, correspondant à des systèmes de culture clairement différents : des parcelles gérées en monoculture de maïs année après année, qui sont les champs de case, et les autres parcelles qui sont gérées par des rotations pluriannuelles de 3 à 4 cultures où l'arachide et/ou le coton sont toujours présents, avec aussi le maïs, éventuellement le sorgho et le niébé. D'après Soltner (1995), il est possible d'avoir du maïs

en monoculture car il ne semble pas laisser dans le sol des résidus toxiques pour lui-même. Par contre il précise que cela est dangereux car toute monoculture déséquilibre le sol et nécessite des fumures minérales plus élevées et coûteuses et un renforcement de la lutte anti-parasitaire. En fait la monoculture de maïs n'est possible (Rouanet, 1997) que si la fertilité du champ est bien maintenue, par des apports de matière organique, et/ou des apports de fertilisant et/ou des rotations avec des légumineuses. Dans nos villages la fertilité des champs de case en monoculture de maïs est assurée par les apports de matière organique (essentiellement le parcage), et celle des autres parcelles est assurée par la présence de légumineuse (arachide ou niébé) et/ou les apports d'engrais systématiquement faits sur le coton (filrière organisée par la Sodefitex), voire parfois sur le maïs (engrais « détourné » du coton). D'après Rouanet (1997), les meilleurs précédents du maïs sont l'arachide et le mil souna.

3. La fertilisation organique a été plus fréquente que la fertilisation minérale. Les agriculteurs qui ont acheté de l'engrais, dans la zone étudiée, ne sont pas nombreux. Dans plus de 90% des cas, l'engrais utilisé provient de la Sodefitex et devrait être utilisé pour fertiliser les cultures de coton. Les agriculteurs prennent une partie de cet engrais pour fertiliser certaines parcelles de maïs. D'après Barbier (1992), l'emploi de la fertilisation minérale en milieu paysan n'est pas habituel dans la majorité des pays africains, en particulier sur les cultures vivrières. Il le devient plus couramment sur les cultures commercialisées.

4. Pour le travail du sol, le schéma conventionnel dans notre échantillon consiste à un nettoyage sur brûlis avant semis puis un labour dans la plupart des cas ou un grattage. Cortier et al (1988) ont recommandé pour le travail du sol d'un labour de 12 à 15 cm de profondeur dans leur étude de l'effet des techniques culturales sur le maïs au Sénégal.

5. Le semis se fait en humide et le plus souvent par un semoir. Une très grande hétérogénéité de la densité de semis a été observée dans tous les villages. Il apparaît que les semoirs ou les disques ne sont pas de très bonnes qualités, et aussi peut-être que les agriculteurs ne maîtrisent pas bien les conditions de semis. La date de semis a été variable dans tous les villages. Les raisons de cet étalement dans chaque village sont diverses : confiance dans la pluie ou non, interférences avec d'autres activités (le coton est semé en général avant les autres cultures), disponibilité, etc. D'après (Violic, 2002), l'un des principaux problèmes du semis du maïs est

le début irrégulier de la saison des pluies. La date de semis est étroitement dépendante de la quantité de travail mais aussi des moyens matériels dont dispose le paysan.

6. L'enherbement était contrôlé par des sarclages (au minimum deux) dans la zone étudiée. Rouanet (1997) préconise que deux ou trois sarclages sont nécessaires, le premier devant avoir lieu au stade de plantule, soit 10 à 15 jours après la levée et le deuxième au début de la montaison.

L'herbicide utilisé dans la zone enquêtée est sélectif du maïs, il est dépressif sur la courge et non sur le niébé. C'est pourquoi, les agriculteurs ne font pas de traitement avec l'herbicide, si le maïs est associé avec la courge. L'emploi des désherbants sélectifs entraîne une prolifération de certaines adventices graminées de la même famille que le maïs (Soltner, 1995).

7. Les principales associations dans notre échantillon sont : maïs-courge et maïs-niébé. Les associations de culture permettent une meilleure utilisation des ressources du milieu, une meilleure protection contre les agents climatiques et une limitation des adventices. Elles apportent aussi des inconvénients car la plupart des herbicides, bien tolérés par le maïs, ne le sont pas pour la courge (Rouanet 1997).

8. Les corrélations entre type de champs et aspects de la fertilité et de la gestion montrent les remarques suivantes :

- les champs de case sont consacrés à la monoculture du maïs et reçoivent une fertilisation organique (parcage et/ou fumier) ;
- les autres champs montrent des rotations incluant de l'arachide et du coton, avec utilisation d'engrais ;
- Le fait qu'on retrouve très peu de coton et d'arachide dans les champs de case justifie en fin de compte de l'effectivité de notre échantillonnage

9. Une très grande variabilité intra-parcellaire des rendements a été constatée dans tous les villages. Ces données justifient bien le fait qu'il faut effectuer au moins 3 mesures dans des placettes pour chaque placette. On peut même penser qu'il faudrait en effectuer 5 ou plus. Compte tenu de la variabilité intra-parcellaire observée, il est plus pertinent pour ce type de suivi de multiplier les points de mesure, c'est-à-dire les placettes, au sein d'une parcelle, que

de n'en faire qu'une par parcelle mais avec une taille plus importante. Bien entendu il ne faut pas non plus trop réduire la taille des placettes : la dimension de 20 m² environ que nous avons utilisée nous semble une bonne chose.

10. La densité de plante à l'hectare est la première composante de rendement mise en place au cours du cycle de développement du maïs. Elle détermine toutes les autres composantes. Elle est la seule sur laquelle l'agriculteur peut intervenir directement et qui résulte d'un choix. Dans notre étude, les rendements sont faiblement corrélés à cette composante. Douay (1997), Scopel et Louette (1992) ont trouvé une faible corrélation du rendement avec le Nombre de Pieds par surface dans leurs travaux. Le nombre de plantes présentes à la récolte par unité de surface est déterminé par la densité de semis diminué par des pertes à la levée, des démariages, et des pertes en végétation. Un pied manquant représente en effet au moins un épi manquant ; cette perte ne sera pas compensée par la plante voisine puisque, contrairement aux autres céréales, les plants de maïs ne tallent pas. Par ailleurs même si le développement végétatif des plantes voisines peut être favorisé par l'espace disponible, leur production en grain ne remplace pas celle de l'épi manquant (Duparque et al, 1991).

Les rendements sont par contre corrélés à la composante « Nombre d'Epis Productifs par pied ». Le nombre d'épis par plante ne se réfère pas à ce qu'on nomme prolificité. Il représente tous les épis visibles, productifs ou non. Il s'agit d'un caractère qui se détermine après l'initiation florale et se fixe définitivement en début de floraison. Il est déterminé à l'échelle de la parcelle par le nombre total d'épis divisé par le nombre de plantes. Les plantes non fertiles représentent une proportion de plantes actives, captant une part des ressources du milieu et non productives. Dans une parcelle, certains pieds de maïs sont stériles, d'autres ont un épi ou deux épis. Deux épis sur un même pied de maïs ne sont pas en position de compétition, mais l'un domine totalement l'autre (Fleury, 1991).

Les rendements sont corrélés à la composante poids des grains par pied. Il intègre les composantes : nombre d'épis productifs par pied et le poids des grains par épi. Wey (1998), a trouvé des corrélations entre le rendement et les composantes (nombre de grains et poids d'un grain). Pour les suivis des années à venir il faudra veiller à déterminer le poids moyen des grains (poids de mille grains, PMG), ce qui permettra de déterminer le nombre de grains par épi. Le poids de grains dépend du remplissage des grains qui dépend lui aussi des quantités de réserves accumulées dans la tige, les feuilles et les racines, de la faculté de remobilisation

de ces réserves et de l'état de l'appareil végétatif (Girardin, 1991). Une sénescence précoce du système foliaire perturbe l'activité photosynthétique et donc la disponibilité des assimilats.

11. Malgré la forte hétérogénéité des rendements et les différences entre les villages nous avons pu mettre en évidence un effet significatif de la fertilisation organique sur les rendements, en particulier un effet du parcage. C'est pourquoi, Badiane (1993) préconise l'association agriculture-élevage pour la fertilisation organique des sols.

L'apport d'engrais dans les parcelles suivies a été faible et n'a pas beaucoup influencé les rendements. Le prix et la disponibilité des engrais minéraux en début de campagne déterminent la décision d'achat et le taux d'utilisation (Badiane, 1993). La réponse des cultures aux engrais en milieu paysan est fortement influencée par la pluviométrie, la disponibilité des éléments nutritifs dans le sol et la date de semis (Sansan et al, 1995).

12. A l'échelle des parcelles les résultats des relations entre les rendements et les bilans hydriques estimés sont globalement logiques car elles montrent des tendances. Cependant il est difficile d'en dire plus car nous avons différentes incertitudes sur les valeurs traitées, en particulier du fait des incertitudes sur les phases des cycles et sur les bilans hydriques.

13. A l'échelle intégrée des villages les indicateurs hydriques que nous avons voulu évaluer ne semblent pas pertinents. On peut penser que le fort étalement des dates de semis va représenter une contrainte pour les modalisateurs et les prévisionnistes agricoles. Par comparaison les choses sont plus simples avec la culture du mil pour laquelle on a en général une ou deux dates de semis dans chaque village, ceci en relation avec les premières pluies utiles. C'est ce qui a permis de développer l'outil de prévision des rendements du mil utilisé par l'Agrymet, le DHC (Samba, 1998).

CONCLUSION

Ce travail repose essentiellement sur une enquête et un suivi en milieu paysan réalisés sur 159 parcelles dans cinq villages. L'analyse finale prend en compte un échantillon de 120 parcelles et réunit de nombreuses variables touchant d'abord la variabilité intra-régionale, les types de champs, aux caractéristiques des systèmes de culture, aux rendements et ses composantes.

Cette étude a permis d'atteindre son principal objectif qui était de caractériser la variabilité des rendements en maïs au niveau intra-villageois (entre parcelles d'un même village) et inter-villageois. Elle a également permis de répondre partiellement à son second objectif : la compréhension des niveaux de rendement, c'est-à-dire compréhension et caractérisation de leurs conditions d'élaboration.

L'analyse des facteurs de variabilité des rendements du maïs a montré l'importance de la fertilisation organique. Les indicateurs hydriques ont indiqué a priori de bonnes conditions pour la grande majorité des parcelles et n'ont pas été déterminants pour expliquer des différences.

Cependant nous avons pu mettre en évidence certaines insuffisances qui amènent à nuancer les conclusions. Ainsi des limites de la démarche ont pu être soulignées. Il s'agit notamment du caractère partiel ou approximatif de certaines informations :

- des informations socio-économiques de la zone d'étude ;
- la caractérisation des cycles et phases des cultures : imprécision sur les dates de floraison et maturité ;
- la caractérisation des variétés : confusion entre deux variétés de maïs à grains jaunes ;
- des informations sur les conditions d'enherbement.

Ces insuffisances sont normales puisqu'il s'agissait d'une première expérience dans la région dans le cadre des recherches menées par le CERAAS.

Il apparaît au terme de cette démarche, que l'étude faite sur une année climatique limite la portée des conclusions. Un tel travail devra être poursuivi sur plusieurs années afin d'identifier la variabilité interannuelle.

BIBLIOGRAPHIE

- AFFHOLDER F., 1994.** Influence de la fertilisation et du contrôle de l'enherbement sur la réponse des rendements du mil pluvial à un indice hydrique synthétique. In *Bilan hydrique agricole en Afrique tropicale*. Séminaire international, Bamako, 9-13 décembre 1991, p 191-203.
- AGPM, ITCF, 1979.** Le cycle du maïs. Dépliant informatif.
- ANSD, 2005.** Situation économique et sociale du Sénégal. Ministère de l'économie et des finances. République du Sénégal, 235p.
- ARORA V. K., GAJRI P. R., 2000.** Assessment of a crop growth-water balance model for predicting maize growth and yield in a subtropical environment. *Agricultural Water Management*; 46, p 157-166.
- BA A. T., NOBA K., 2001.** Flore et biodiversité végétale au Sénégal. *Sécheresse* 12 (3) : p 149-155.
- BADIANE A. N., 1993.** Le statut organique d'un sol sableux de la zone centre-nord du Sénégal. Thèse INPL, Lorraine 200 p.
- BARBIER B., 1992.** Modélisation agronomique et économique de la durabilité d'un système agraire villageois. Le cas du village de Bala au Burkina Faso. Thèse Dr ingénieur, ENSA, Montpellier, 329 p.
- BARLOY J., 1983.** L'élaboration du rendement. . In *Physiologie du maïs*, AGPM-INRA Edit., Royan (Fra), colloque 13-17 mars 1983, p 163-180.
- BARLOY J., 1983.** Phase germination, levée et implantation. . In *Physiologie du maïs*, AGPM-INRA Edit., Royan (Fra), colloque 13-17 mars 1983, p 13-47.
- BLONDON F., 1983.** Mise en place de l'appareil reproducteur et maturation. . In *Physiologie du maïs*, AGPM-INRA Edit., Royan (Fra), colloque 13-17 mars 1983, p 101-115.
- BONHOMME R., RUGET F., 1991.** Modélisation agrophysiologique de l'élaboration du rendement du maïs. In : *Physiologie et production du maïs*, AGPM et INRA Edit. Paris (FRA), Pau (Fra) colloque 13-15 nov. 1990, p 385-392.
- BROUTIN C., SOKONA K., TANDIA A., 2000.** Aperçu de la filière céréales au Sénégal. ENDA GRAF, 18 p.
- CAMARA P.A., 1985.** Catalogue des variétés de maïs créées par l'ISRA Dakar, 15p.
- CASENAVE A., VALENTIN C., 1989.** Les états de surface de la zone sahélienne. Influence sur l'infiltration. Collection didactique. Paris : Orstom éditions, 229 p.
- CHOPART J. L., KONE D., 1994.** Fluctuation de l'alimentation hydrique du maïs en région centre. In *Bilan hydrique agricole en Afrique tropicale*. Séminaire international, Bamako, 9-13 décembre 1991, p 39-47.
- COLY S. I. P., 2004.** La filière maïs local dans le département de Vélingara : Situation actuelle et perspective. Mémoire ingénieur, ENSA, Thiès, 91 p.
- CORTIER B., 1994.** Le diagnostic hydrique des cultures et la prévision précoce des rendements en mil en zone sahélienne. In *Bilan hydrique agricole en Afrique tropicale*. Séminaire international, Bamako, 9-13 décembre 1991, p 349-362.

CORTIER B., POCTHIER G., IMBERNON J., 1988. Le maïs au Sénégal : effets des techniques culturales et des conditions hydriques en culture pluviale. *L'Agronomie Tropicale*, 43 (2) : p 85-90.

DIAOU M., 2003. Evaluation de la croissance et de la productivité du maïs : paramétrage d'un modèle de bilan carbone pour la prévision agricole au Sénégal. DEA, UCAD, 56 p + annexes.

DIOUF M., 1990. Analyse de l'élaboration du rendement du mil. Mise au point d'une méthode de diagnostic en parcelles paysannes. Thèse, INAPG, Paris, 227 p.

DOUAY C., 1997. Contribution à l'explication de la variabilité des rendements de maïs dans une petite région agricole du Brésil. Mémoire DAA, ENSA, Montpellier, 43 p + annexes.

DUPARQUE A., FLEURY A., LORGEOU J., 1991. Evolution de l'hétérogénéité d'un peuplement jeune de maïs et répercussions sur le rendement et ses composantes. In *Physiologie et production du maïs*, AGPM et INRA Edit. Paris (FRA), Pau (Fra) colloque 13-15 nov. 1990, p 307-317.

EAGLEMAN J. R., 1971. An experimentally derived model for actual evapotranspiration. *J. Appl. Meteorol.*, 6, p 482-488.

FAO., 1987. Amélioration et production du maïs, du sorgho et du mil. Volume 2 : sélection, agronomie et production des semences. Production végétale et protection des plantes, 559 p.

FAO., 1998. Crop evapotranspiration. Guidelines for computing crop water requirements. FAO irrigation and drainage paper number 56. Rome, 300 p.

FAYE J., 2001. L'agriculture paysanne sénégalaise peut-elle survivre ? In *La sécurité alimentaire au Sahel dans le contexte de la mondialisation et de l'intégration Ouest-Africaine*. Actes de l'atelier sous régional. RADI-Christian Aid-USC. Dakar 29-31 mai 2001, p 172-175.

FLEURY A., 1991. Méthodologie de l'analyse de l'élaboration du rendement. In *Physiologie et production du maïs*, AGPM et INRA Edit. Paris (FRA), Pau (Fra) colloque 13-15 nov. 1990, p 279-290.

FOREST F., CLOPES A., 1994. Contribution à l'explication de la variabilité du rendement d'une culture de maïs plus ou moins intensifiée à l'aide d'un modèle de bilan hydrique amélioré. In *Bilan hydrique agricole en Afrique tropicale*. Séminaire international, Bamako, 9-13 décembre 1991, p 3-15.

FOREST F., REYNIERS F. N., 1986. Proposals for the classification of agroclimatic situations of upland rice in terms of water balance. In *Progress in upland rice research*, Proceedings of the 1985 Jakarta conference, p 93-103.

FOURNIER C., 2000. Modélisation des interactions entre plantes au sein des peuplements. Application à la simulation des régulations de la morphogenèse aérienne du maïs par la compétition pour la lumière. Thèse INAPG, Paris, 61 p + annexes.

GAY J. P., 1983. Le cycle du maïs. In *Physiologie du maïs*, AGPM-INRA Edit., Royan (Fra), colloque 13-17 mars 1983, p 1-11.

GAY J. P., BLOC D., 1983. Détermination des composantes du rendement en grain. . In *Physiologie du maïs*, AGPM-INRA Edit., Royan (Fra), colloque 13-17 mars 1983, p 181-192.

GIRARDIN PH., 1991. De l'ovule au grain de maïs mature. In : *Physiologie et production du maïs*. AGPM et INRA Edit. Paris (FRA), Pau (Fra) colloque 13-15 nov. 1990, p 187-200.

- HEMA D., 2000.** Analyse de la stabilité du rendement de variétés de maïs pour les zones sèches du Burkina Faso. *Sécheresse* 11 (3) : p 189-193.
- LAFITTE H. R., 2002.** Stress abiotique affectant le maïs. In *Le maïs en zones tropicales : amélioration et production*. Collection FAO : Production végétale et protection des plantes, p 97-108.
- LAVABRE E. M., 1988.** Le désherbage des cultures tropicales. Le technicien d'agriculture tropicale. Maisonneuve et Larose éd., 127 p.
- LETERME P., MANICHON H., ROGER-ESTRADE J., 1994.** Analyse intégrée des rendements de blé tendre et de leurs causes de variation dans un réseau de parcelles d'agriculteurs du Thymerais. *Agronomie* ; 14 : p 341-361.
- LORGEOU J., 1991.** Des références pour des variétés. In *Physiologie et production du maïs*. AGPM et INRA Edit. Paris (FRA), Pau (Fra) colloque 13-15 nov. 1990, p 291-306.
- MAURIN G., PATERNELLE M.-C., CLUZEAU S., 1999.** Guide pratique de défense des cultures : reconnaissance des ennemis, notions de protection des cultures. Association de Coordination Technique Agricole, 576 p.
- MAE, 2000.** Recensement national de l'agriculture 1998-1999, Vol 4 Rapport général du recensement de l'agriculture pluvial. République du Sénégal, FAO, 536p.
- MDRA, 2007.** Bilan de la campagne agricole 2006/2007 - Evaluation de campagne agricole 2007/2008. Rapport de concertation technique sur les bilans céréaliers .Dakar du 29 oct. au 02 nov., 19 p.
- MEMENTO DE L'AGRONOME., 2002.** 5^{ème} édition, 1700p.
- MICHEL P., SALL M., 1980.** Géologie et hydrologie. In *Atlas du Sénégal*. Edition j.a, p 8-9.
- MOLLIER A., 1999.** Croissance racinaire du maïs sous déficience en phosphore. Etude expérimentale et modélisation. Thèse de l'université Paris XI Orsay, 197 p.
- NDIAYE A., 1987.** La sélection variétale du maïs au Sénégal et l'étude de l'organisation de la variabilité génétique des populations. ISRA, Dakar, 32p.
- NDIAYE M., 1997.** Contribution des légumineuses arbustives à l'alimentation azotée du maïs : cas d'un système de culture en allées dans le Centre-Sud Sénégal. Thèse INPL, Lorraine, 123 p + annexes.
- NDIAYE M., SIDIBE M., 1992.** Recherche de formules d'engrais N-P-K économiquement rentables pour la culture du maïs pluvial. Etude et documents. ISRA. Vol., n°2, 24p.
- OLUFAYO A., 1994.** Caractérisation des réponses du sorgho grain au déficit hydrique à l'aide d'indicateurs bioclimatiques. Thèse ENSAR, Rennes, 93 p + annexes.
- PALIWAL R. L., 2002.** Introduction au maïs et son importance. In *Le maïs en zones tropicales : amélioration et production*. Collection FAO : Production végétale et protection des plantes, p 1-3.
- PALIWAL R. L., 2002.** Morphologie du maïs tropical. In *Le maïs en zones tropicales : amélioration et production*. Collection FAO : Production végétale et protection des plantes, p 13-20.
- PALIWAL R. L., 2002.** Environnement du maïs. In *Le maïs en zones tropicales : amélioration et production*. Collection FAO : Production végétale et protection des plantes, p 59-82.

- POSS R., SARAGONI H., IMBERNON J., 1988.** Bilan hydrique simulé du maïs au Togo méridional. . *L'Agronomie Tropicale*, 43 (1): p 18-29.
- RITCHIE S. W., HANWAY J. J., 1992.** How a corn plant develops. Special report N°48. Ames, IA, USA, Iowa State University, 21 p.
- ROUANET G., 1997.** Le maïs. Le technicien de l'agriculture. Maisonneuve et Larose éd., 142 p.
- RUGET F., 1994.** Elaboration du rendement chez le maïs. In *Elaboration des rendements des principales cultures annuelles*. INRA éditions, p 73-83.
- SALAH H. B. H., 1996.** Analyse de la vitesse de croissance foliaire du maïs en conditions climatiques fluctuantes. Conséquences de déficits hydriques dans le sol. Thèse INAPG, Paris, 73 p + annexes.
- SAMBA A., 1998.** Les logiciels DHC de diagnostic hydrique des cultures – Prévission des rendements du mil en zones soudano-sahéliennes de l'Afrique de l'ouest. *Sécheresse* ; n°4, vol 9, p 281-288.
- SANSAN Y., HIEN V., LOMPO F., THIOMBIANO L., DIABY B., 1995.** Evaluation en milieu paysan de formules de fumures à base de phosphate naturel: cas de l'utilisation du maïs amélioré au Burkina Faso. In *Contributing to food self-sufficiency : maize research and development in west and central Africa*. Proceedings of a regional maize workshop, p 247-254.
- SARR B., DIOUF O., DIOUF M., ROY-MACAULEY H., 1999.** Suivi de l'état hydrique du sol et de la température du couvert de maïs au Sénégal. *Sécheresse* 10 (2) : p 129-135.
- SARR O., WADE I., 2005.** Agriculture. In *Situation économique et sociale du Sénégal*. Ministère de l'économie et des finances, ANSD, République du Sénégal, p 69-76.
- SCOPEL E., LOUETTE D., 1992.** Une méthode de diagnostic agronomique basée sur l'enquête : application au maïs pluvial à Pueblo Juarez, Mexique. *L'agronomie Tropicale* ; 46-4 : p 283-294.
- SENE M., 1999.** Analyse de l'influence des systèmes de culture sur la variabilité des rendements du sorgho et sur son effet allélopathique dans le Sine-Saloum. Thèse INAPG, Paris, 186 p + annexes.
- SIBAND P., WEY J., OLIVER R., LETOURMY P., MANICHON H., 1999.** Analysis of the yield of two groups of tropical maize cultivars. Varietal characteristics, yield potentials, optimum densities. *Agronomie* 19: p 379-394.
- SOLTNER D., 1995.** Les grandes productions végétales. Collection sciences et techniques agricoles, 18^{ème} édition, 471 p.
- SY A. A., 2004.** Conduite de la culture du maïs en zone cotonnière sénégalaise : Analyse des pratiques paysannes dans le département de Vélingara. Mémoire Ingénieur, ENSA, Thiès, 76p + annexes.
- VIOLIC A. D., 2002.** Gestion intégrée de la culture. In *Le maïs en zones tropicales : amélioration et production*. Collection FAO : Production végétale et protection des plantes, p 251-297.
- WARRINGTON U. J., KANEMASU E. T., 1983.** Corn growth response to temperature and photoperiod. *Agronomie*; J. 75, p 755-761.
- WEY J., 1998.** Analyse de la variabilité du rendement de maïs dans l'Ouest du Burkina Faso. Thèse INPL, Lorraine, 200 p.

VARIABLES D'ENQUETE

Type de champ : confins, case, brousse, brousse_confins.

Précédent : M (maïs), arachide, jachère, céréale, coton.

Rotation : MMM (maïs- maïs- maïs), Autre, ACotCer (arachide-coton-céréale), Cer (céréale), Cot (coton), AMA (arachide-maïs-arachide), avec_coton, sans_coton.

Parcage : parcage06 (parcage en 2006), pas_parc06 (pas de parcage en 2006).

Fumier : fumier06 (fumier 2006), pas_fum06 (pas de fumier en 2006).

Matière organique : pas_MOrg06 (pas de matière organique en 2006), MOrg06 (matière organique en 2006), pas_MOrg05 (pas de matière organique en 2005), MOrg05 (matière organique en 2005), bcp_MO2ans (beaucoup de matière organique les 2 dernières années), moyen_MO2ans (matière organique moyen dans les 2 dernières années), faible_MO2ans (matière organique faible dans les 2 dernières années), pas_MO2ans (pas de matière organique dans les 2 dernières années).

Engrais : engrais06 (engrais 2006), pas_engrais06 (pas d'engrais en 2006).

Fertilisation : pas_fert06 (pas de fertilisation en 2006), Fert06 (fertilisation en 2006), pas_fert05 (pas de fertilisation en 2005), Fert05 (fertilisation en 2005), bcp_Fert2ans (beaucoup de fertilisation dans les 2 dernières années), moyen_Fert2ans (fertilisation moyenne dans les 2 dernières années), faible_Fert2ans (faible fertilisation dans les 2 dernières années), très_faible_Fert2ans (très faible fertilisation dans les 2 dernières années).

Fertilisation tous les ans : apports_irrégulé (apports irréguliers), tous_ans_parcage (tous les ans parcage), rien_tous_ans (rien tous les ans), tous_ans_engrais (tous les ans engrais).

Travail du sol : labour, grattage.

Date de semis par pentade : Juin1 (1^{ère} pentade du mois de juin), juin2 (2^{ème} pentade du mois de juin), etc.

Herbicide : Herbicide, sans_herb (sans herbicide).

Sarclage : sarclag2 (2 sarclages), sarclag3 (3 sarclages), sarclag4 (4 sarclages).

Culture associée : pas_assoc (pas d'association), association.

Type de sol : deck-dior, deck, sablo-argileux.

Ethnie : Peulh, Ethnie (diakhanké ou autres).

LISTE DES COMPOSANTES

Rendt = rendement

Dens. réc = densité à la récolte

Eprod/pied = nombre d'épis productifs par pied

G g/épis = poids des grains par épis

G g/pied = poids des grains par pied

ABREVIATIONS DES VILLAGES

Bira = Birataba

Foug =Fougoulou

Ham = Hamdallaye Pont

Mad =Madina Diam

Sar = Saroudia

LISTE DES ANNEXES

ANNEXE 1 : Localisation de la zone d'étude et des villages suivis

ANNEXE 2 : Carte des sols de la zone d'étude

ANNEXE 3 : Répartition des différentes parcelles suivies par village

ANNEXE 4 : Données économiques et démographiques

ANNEXE 5 : Fiche technique pour la culture du maïs

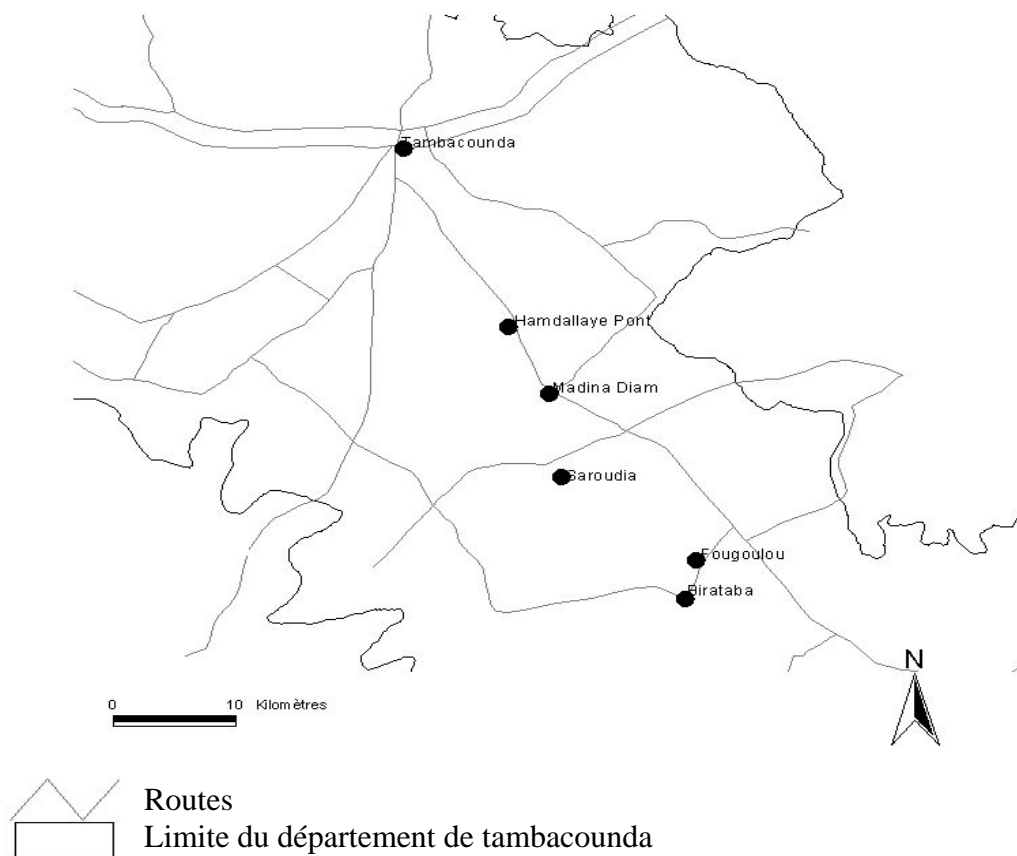
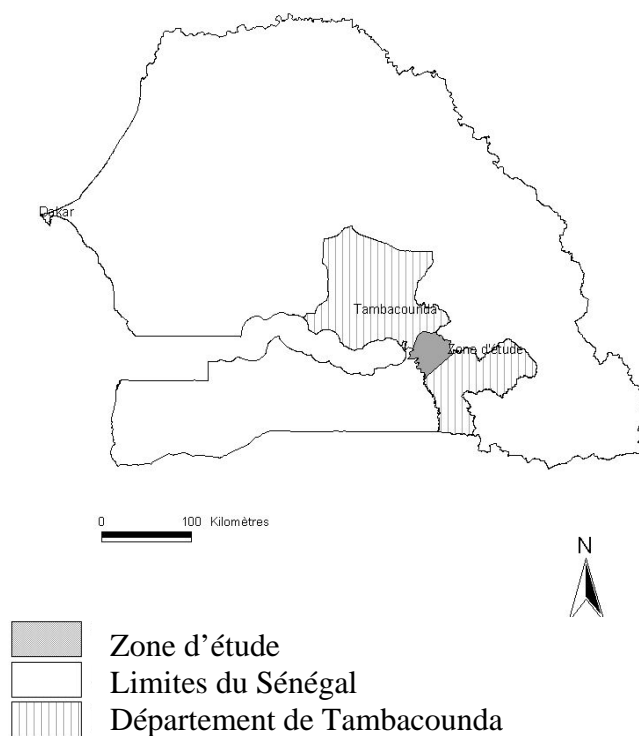
ANNEXE 6 : Fiche d'identification parcelle Tambacounda 2006

ANNEXE 7 : Phases de développement, cycles et valeurs des coefficients cultureux (Kc)

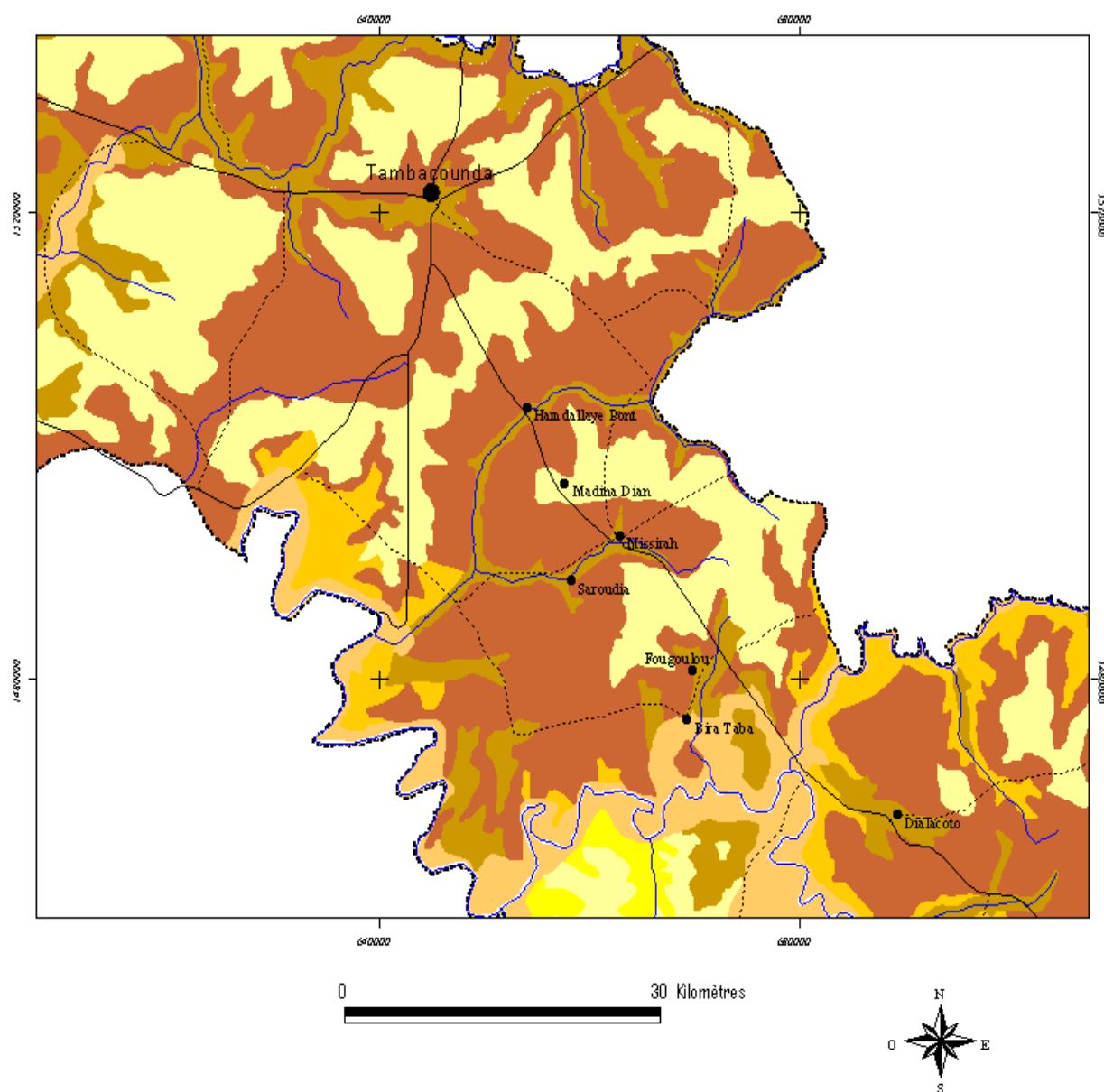
ANNEXE 8 : Date de semis et durée des cycles par village

ANNEXES

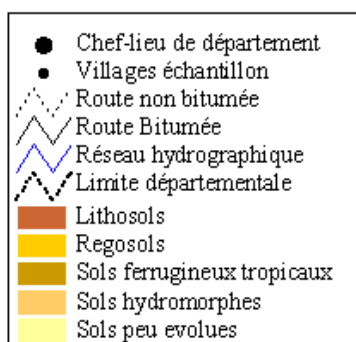
ANNEXE 1 : Localisation de la zone d'étude et des villages suivis



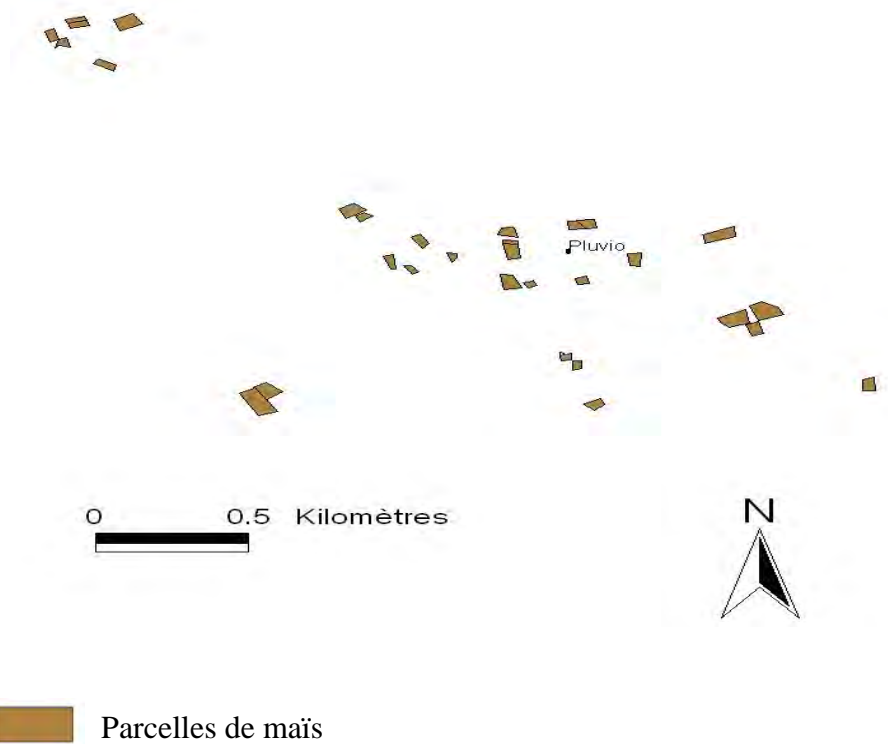
ANNEXE 2 : Carte des sols de la zone d'étude (Source LERG 2007)



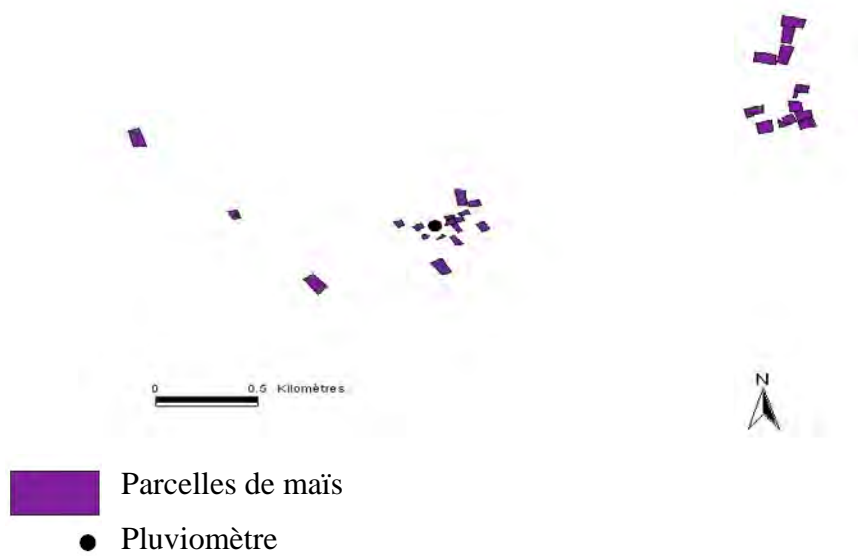
Légende



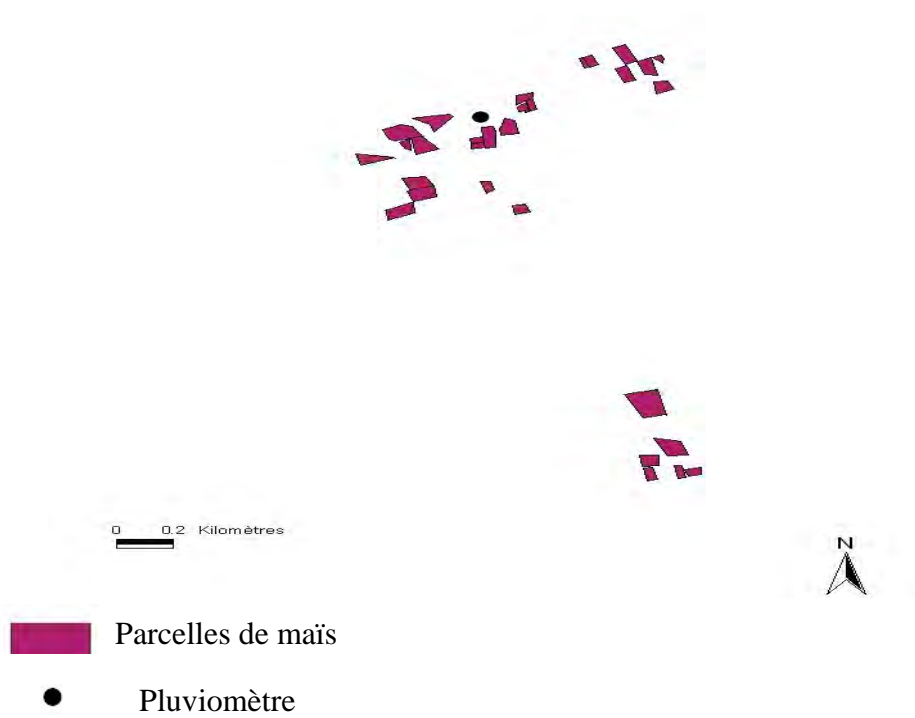
ANNEXE 3 : Répartition des différentes parcelles suivies par village



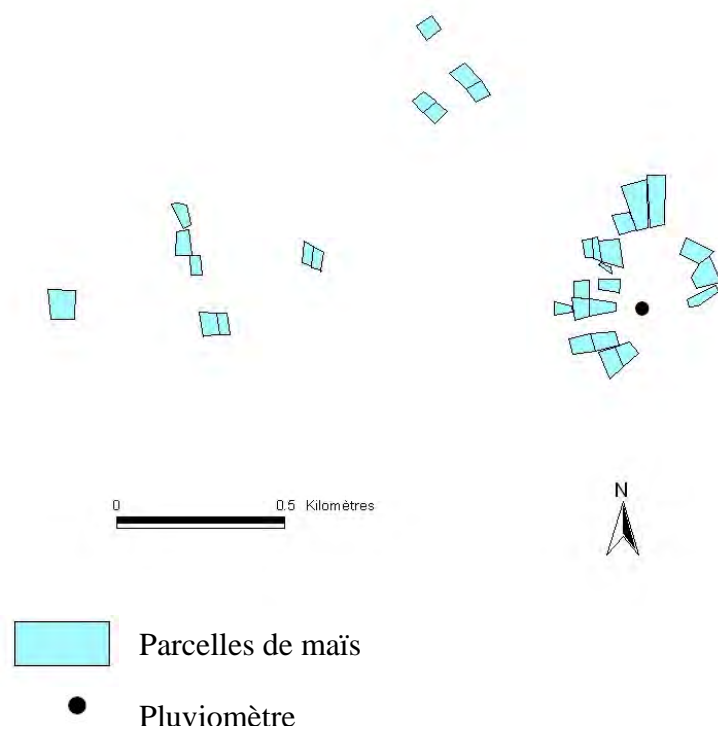
Répartition des parcelles de maïs à Hamdallaye Pont



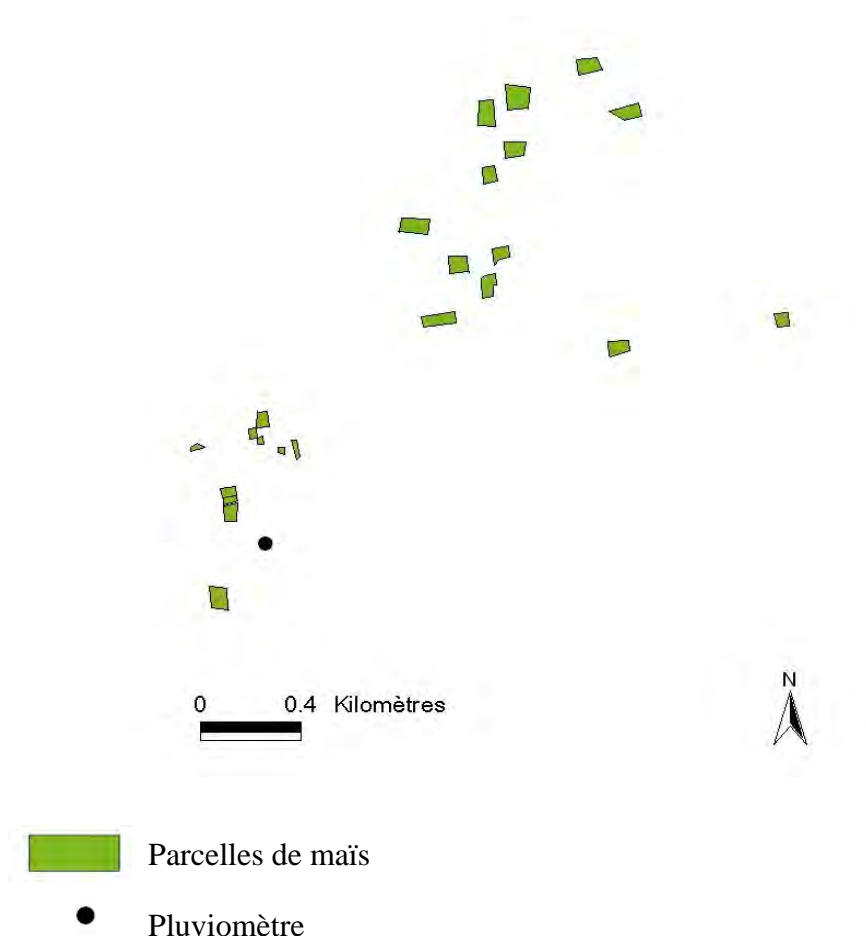
Répartition des parcelles de maïs à Madina Diam



Répartition des parcelles de maïs à Saroudia



Répartition des parcelles de maïs à Fougoulou



Répartition des parcelles de maïs à Birataba

ANNEXE 4 : Données économiques et démographiques

1. Données économiques quantitatives de la situation de l'économie céréalière du département de Tambacounda (période 1997 à 2006 ; source SDDR Tambacounda)

Dans le département de Tambacounda, le maïs est la première céréale, si l'on considère le rendement en grain par hectare. Le tableau ci-dessous donne la situation pour le mil, le sorgho et le maïs pour les dix dernières années. Les surfaces cultivées et les productions en maïs ont connu une évolution croissante depuis ces trois dernières années. Les surfaces moyennes en maïs ont été estimées à 8196 hectares entre 1997 à 2001. Elles ont passé à 20656 hectares entre 2002 à 2006.

CULTURE	MIL			SORGHO			MAIS		
	Surface (ha)	Rdt (kg/ha)	Production (t)	Surface (ha)	Rdt (kg/ha)	Production (t)	Surface (ha)	Rdt (kg/ha)	Production (t)
campagne									
1996-1997	28466	732	20833	21739	822	17869	9232	1247	11512
1997-1998	31363	713	22362	23811	913	21739	6608	985	6509
1998-1999	36826	761	28025	31730	1013	32142	7156	677	4845
1999-2000	54985	769	26904	33951	1004	34071	7228	737	5330
2000-2001	27000	1133	30591	29760	1255	28810	10754	1120	12141
2001-2002	31201	900	28081	27807	950	26417	16847	1337	22524
2002-2003	31297	780	23786	28668	792	22705	20913	363	7591
2003-2004	62844	792	49772	46374	1169	54211	24983	2171	54238
2004-2005	41352	1439	59506	27050	1339	36220	18864	3264	61522
2005-2006	43708	850	37152	35793	1250	44741	21672	3000	65016

Rdt : rendement ; ha : hectare ; t : tonne ; kg/ha : kilogramme par hectare.

2. Données démographiques des villages suivis (Source : MAE, 2000)

Villages	Nombre de concessions	Nombre de ménages	Population		
			Hommes	Femmes	Total
Hamdallaye Pont	28	28	86	83	169
Madina Diam	35	33	116	125	241
Saroudia	7	7	46	56	102
Fougoulou	27	27	125	112	237
Birataba	38	46	227	245	472

ANNEXE 5 : Fiche technique pour la culture du maïs (Camara, 1985)

1. Préparation

- Epandage d'engrais NPK 200 Kg/Ha de 8-18-27 (semi-intensif), ou parcage durant la saison sèche dans les zones à pâturage
- Labour en humide à la charrue à bœufs ou au tracteur. A défaut d'outils perfectionnés, labour à la dent

2. semis

- Désinfection des semences
- Variétés BDS III, ZM 10, HVB-1, JDB, Synthétic-C, CP 75, EVC-B, EVC-J, QPM 1 etc.
- Semer après une première pluie
- Utiliser un désherbage chimique

3. Démariage et entretien

- Premier binage 10 jours après le semis si on n'a pas utilisé de l'herbicide
- Démariage à 1 pied 15 à 18 jours après semis + sarclage manuel sur la ligne
- Faire un autre sarclage manuel sur la ligne si ce dernier est nécessaire
- Deuxième binage 15 jours après le premier
- Buttage au 40^{ème} jour dans les terrains lourds
- Autre binage à la demande

4. Fumure après la levée

- 100 Kg/Ha urée au 27^{ème} jour
- 100 Kg/Ha urée au 40^{ème} jour

5. Traitements phytosanitaires

Contre les chenilles légionnaires et autres prédateurs

6. Récolte

Maturation effective quand le grain ne se raie plus à l'ongle et les spathes sont jaunes

7. Traitement des semences pour la conservation

8. Enfouissement des pailles

Enfouir les pailles par un labour à la charrue après la récolte ou brûlis de paille début juin juste avant la préparation de la culture suivante

ANNEXE 6 : Fiche d'identification parcelle Tambacounda 2006

Site/Village : **Date :**
Identification parcelle : **Surface approximative :**
Culture principale : **Culture associée :**
Nom propriétaire : **Ethnie**
Langue(s) : **Niveau d'étude :** **Niveau technique**
Animaux ? : **Gestion pour parcage :**
Rôle/position/responsabilité (coopérative paysanne ? Sodefitex ?)

Identification GPS :
Pluviomètre (s) le (s) plus proche (s) :

Type de parcelle :
Champs de case/ brousse/ confins **Date défrichage (1^{ère} culture) :**
Distance au lieu d'habitation (village) :

Précédents et qualité parcelle : très bonne/bonne/moyenne/pas bonne/mauvaise

2005 :	Rendement :	Gestion :	Pluie ? :	Problème :
2004 :	Rendement :	Gestion :	Pluie ? :	Problème :
2003 :	Rendement :	Gestion :	Pluie ? :	Problème :
2002 :	Rendement :	Gestion :	Pluie ? :	Problème :
2001 :	Rendement :	Gestion :	Pluie ? :	Problème :

Penser au striga

Type de sol et topographie :

Problème ?
Profond/moyen/peu profond/caillouteux ? **Profondeur cm :**
Très sableux/dieri * sableux/dior * deck-dior * sablo-argileux/deck * « plus lourd » * autre
Couleur humide : couleur sec :
Nom pédologique/carte :
Terrain plat/ haut de pente/milieu de pente/bas pente/bas fond/cuvette
Appréciation des pentes :
Topographie générale :

Environnement :

Arbres, arbustes, présence de souches, etc.

Préparation/amendements 2006 :

Nettoyage brûlis période :
Aucun amendement (rien)
Parcage : nombre et type animaux, date, durée, modalité (jour, nuit, ou jour et nuit) :

Apports organiques (charrette) : poudrette/fumier décomposé/compost/autre

Type animaux/quantité/date/répartition/enfouissement/homogénéité répartition

Fertilisants : NPK/urée

Quantité/date/provenance/modalité/enfouissement/homogénéité/répartition

Amendements/fumures :

2005 :

2004 :

2003 :

2002 :

Travail du sol :

Aucun

Grattage simple instrument ?

Labour à plat profondeur ? Instrument ?

Billonnage

Force/modalité de travail (traction, outils) :

2005 :

2004 :

2003 :

2002 :

Culture principale :

Nom variété :

nom « local » :

Durée supposée du cycle :

date semis :

Culture de rente/culture principale

Récolte en vert (date) :

récolte à maturité :

Semences 2006 : réserve personnelle/acheté/échangé

Conditions de conservation :

Utilisation depuis combien d'années/année du dernier achat semence :

Achetées 2006 : voisins

marché

organisme (lequel)

Certifiées :

origine organisme

Traitement des semences/produits/modalités :

Culture associée :

Nom variété :

nom « local » :

Durée supposée du cycle :

date semis :

Densité-modalité :

Culture de rente/vivrière

Semis culture principale :

Date semis initial :

Manuel

Semoir attelé : disque utilisé :

autre :

En ligne/en courbe de niveau/ aléatoirement

Date toute 1^{ère} pluie

date 1^{ère} pluie utile

En humide date :

1^{er} resemis date :

raisons :

Modalités : toute/portion parcelle/localisé

Manuel/semoir attelé/ autre

Densité semis culture principale :(3 mesures)

Distance entre 6 lignes : / / / /moyenne

Distance entre 11 poquets : / / / /moyenne

Nombre de grains/poquets :

Mélange avec fertilisant ?:

Profondeur enfouissement : poquets bien groupés/étirés/très étirés/ »lignes »

Quantité semence utilisée pour la parcelle :

Temps de semis/nombre de jours homme :

Levée culture principale :

Date observation levée : sur semis initial ou non :

Date estimée du début des levées :

Homogénéité au niveau parcelle : (décalage entre « sous-parcelles » ?)

Homogénéité/qualité de levée :

Irrégularités/hétérogénéités spatiales

Nombre de poquets ayant levé (3 placettes 5*5=25 poquets) :

1^{ère} placette 2^{ème} placette 3^{ème} placette

Nombre de plants sur 10 poquets (/10) pris sur 2 premières lignes :

1^{ère} placette 2^{ème} placette 3^{ème} placette

Si démariage : date (« période ») démariage, stade culture : modalités (manuel/sarcluse)

Sarclages/herbicides : ??

Herbicide ??: pré-levée ?? post-levée ?? plus tard ??(stade culture)

Modalités : produit, quantité, pulvérisateur ; etc.

Achat propre/ »détournement »

Sarclages : date/modalité (sarcluse/main) /raison ?

Présence adventices :

Taux d'enherbement : 1^{ère} placette : 2^{ème} placette : 3^{ème} placette : type adventices :

Densité après démarriage :

A mesurer dans 3 endroits de la parcelle : par 3 fois donc !

Distance entre 6 lignes (/10) : / / / moyenne

Distance théorique entre 11 poquets (/10) : / / / moyenne

Nombre de poquets présents sur 10 emplacements de poquets :

/ / / / / / Moyenne

Nombre de plantes présentes/poquets sur 10 poquets :

/ / / / / / Moyenne

Identification parcelle

Village

Suivis densités :

Date observation :

stade :

Distance entre lignes (1 à 6 lignes) :

/ / / / / /

Moyenne

Date observation :

stade :

Distance entre 6 ou 11 poquets (densité de semis)

/ / / / / /

Moyenne

Nombre de poquets présents/nombre de poquets théorique :

/ / / / / /

Moyenne

Nombre de plants présents/nombre de poquets (arachide : nombre de plants présents/distance) :

/ / / / / /

Moyenne

Date observation :

stade :

Distance entre 6 ou 11 poquets (densité de semis)

/ / / / / /

Moyenne

Nombre de poquets présents/nombre de poquets théorique :

/ / / / / /

Moyenne

Nombre de plants présents/nombre de poquets (arachide : nombre de plants présents/distance) :

/ / / / / /

Moyenne

Date observation :

stade :

Distance entre 6 ou 11 poquets (densité de semis)

/ / / / / /

Moyenne

Nombre de poquets présents/nombre de poquets théorique :

/ / / / / /

Moyenne

Nombre de plants présents/nombre de poquets (arachide : nombre de plants présents/distance) :

/ / / / / /

Moyenne

Date observation :

stade :

Distance entre 6 ou 11 poquets (densité de semis)

/ / / / / /

Moyenne

Nombre de poquets présents/nombre de poquets théorique :

/ / / / / /

Moyenne

Nombre de plants présents/nombre de poquets (arachide : nombre de plants présents/distance) :

/ / / / / /

Moyenne

Identification parcelle :

Village

[illegible]

ANNEXE 7 : Phases de développement, cycles et valeurs des coefficients cultureux (Kc)

	installation				reproduction				reproduction				floraison				floraison				floraison				R. grains				R. grains					
NbJas	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27						
80 j	0.5	0.51	0.51	0.52	0.52	0.53	0.53	0.53	0.54	0.55	0.55	0.57	0.59	0.61	0.63	0.65	0.67	0.69	0.7	0.71	0.75	0.77	0.79	0.8	0.82	0.84	0.86	0.88						
90 j	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.52	0.53	0.55	0.56	0.58	0.58	0.6	0.61	0.62	0.65	0.67	0.69	0.7	0.72	0.74	0.76	0.79						
100 j	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.51	0.52	0.54	0.55	0.56	0.57	0.59	0.6	0.62	0.63	0.65	0.66	0.68	0.69	0.71	0.73	0.74						
110 j	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.51	0.51	0.52	0.52	0.52	0.53	0.53	0.54	0.54	0.56	0.57	0.59	0.6	0.62	0.63	0.65						
120 j	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.51	0.51	0.52	0.52	0.52	0.53	0.53	0.54	0.54	0.55	0.57	0.58	0.6	0.61	0.62	0.64						
130 j	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.51	0.51	0.51	0.52	0.52	0.52	0.52	0.53	0.53	0.54	0.56	0.57	0.58	0.6	0.61	0.62						
NbJas	28	29	30	31	32	33	34	35	36	37	38	39	40	41	42	43	44	45	46	47	48	49	50	51	52	53	54	55						
80 j	0.9	0.93	0.95	0.96	0.96	0.97	0.97	0.98	0.98	0.98	0.99	0.99	1	0.99	0.99	0.98	0.98	0.97	0.96	0.96	0.95	0.95	0.94	0.91	0.89	0.86	0.84	0.81						
90 j	0.81	0.83	0.85	0.87	0.88	0.9	0.91	0.93	0.94	0.96	0.97	0.98	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0.99	0.99	0.98	0.98	0.97						
100 j	0.76	0.77	0.79	0.81	0.82	0.84	0.86	0.88	0.89	0.9	0.91	0.93	0.96	0.96	0.97	0.97	0.97	0.98	0.98	0.99	0.99	1	1	1	1	1	1	1						
110 j	0.66	0.68	0.71	0.73	0.74	0.76	0.78	0.8	0.81	0.83	0.85	0.86	0.88	0.89	0.9	0.92	0.93	0.94	0.95	0.96	0.98	0.99	1	1	1	1	1	1						
120 j	0.65	0.67	0.68	0.69	0.71	0.72	0.73	0.74	0.76	0.77	0.78	0.79	0.82	0.83	0.85	0.86	0.88	0.89	0.9	0.92	0.93	0.95	0.96	0.96	0.97	0.97	0.98	0.98						
130 j	0.63	0.65	0.66	0.67	0.68	0.7	0.71	0.72	0.73	0.74	0.75	0.76	0.78	0.79	0.8	0.82	0.83	0.84	0.85	0.87	0.88	0.9	0.91	0.92	0.93	0.94	0.95	0.96						
NbJas	56	57	58	59	60	61	62	63	64	65	66	67	68	69	70	71	72	73	74	75	76	77	78	79	80	81	82	83						
80 j	0.79	0.76	0.74	0.71	0.69	0.67	0.65	0.63	0.61	0.6	0.58	0.56	0.54	0.52	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5									
90 j	0.97	0.96	0.95	0.95	0.94	0.91	0.89	0.86	0.84	0.81	0.79	0.76	0.74	0.71	0.69	0.67	0.65	0.63	0.61	0.6	0.58	0.56	0.54	0.52	0.5	0.5	0.5	0.5						
100 j	1	1	1	1	1	0.98	0.97	0.96	0.94	0.93	0.91	0.9	0.88	0.87	0.85	0.83	0.81	0.79	0.77	0.75	0.73	0.71	0.69	0.67	0.65	0.63	0.62	0.6						
110 j	1	1	1	1	1	1	0.99	0.99	0.99	0.98	0.98	0.97	0.97	0.96	0.96	0.94	0.93	0.91	0.89	0.88	0.86	0.84	0.82	0.81	0.79	0.77	0.76	0.74						
120 j	0.98	0.99	0.99	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0.99	0.99	0.98	0.98	0.98	0.98	0.97	0.97	0.96	0.94	0.93	0.91						
130 j	0.96	0.97	0.98	0.99	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0.99	0.99						
NbJas	84	85	86	87	88	89	90	91	92	93	94	95	96	97	98	99	100	101	102	103	104	105	106	107	108	109	110	111						
80 j																																		
90 j	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5																											
100 j	0.59	0.58	0.56	0.55	0.53	0.52	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5																		
110 j	0.73	0.71	0.69	0.68	0.66	0.65	0.63	0.62	0.6	0.59	0.58	0.57	0.55	0.54	0.53	0.51	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5						
120 j	0.89	0.88	0.86	0.84	0.82	0.81	0.79	0.77	0.76	0.74	0.73	0.71	0.69	0.68	0.66	0.65	0.63	0.62	0.6	0.59	0.58	0.57	0.55	0.54	0.53	0.51	0.5	0.5						
130 j	0.98	0.98	0.98	0.97	0.97	0.96	0.96	0.94	0.93	0.91	0.89	0.88	0.86	0.84	0.82	0.81	0.79	0.77	0.76	0.74	0.73	0.71	0.69	0.68	0.66	0.65	0.63	0.62						
NbJas	112	113	114	115	116	117	118	119	120	121	122	123	124	125	126	127	128	129	130															
80 j																																		
90 j																																		
100 j																																		
110 j																																		
120 j	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5																									
130 j	0.6	0.59	0.58	0.57	0.55	0.54	0.53	0.51	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5						

NbJas= nombre de jours après semis ; R. grains = remplissage de grains ; 80 j = 80 jours, 90 j = 90 jours...

ANNEXE 8 : Date de semis et durée des cycles par village

		Date semis	durée cycle
Birataba	Minimum	9-juin	100
	Maximum	15-juil.	130
	Moyenne	26-juin	116
Fougoulou	Minimum	14-juin	90
	Maximum	6-juil.	120
	Moyenne	26-juin	105
Hamdallaye Pont	Minimum	5-juil.	80
	Maximum	3-août	110
	Moyenne	19-juil.	97
Madina Diam	Minimum	30-mai	90
	Maximum	21-juil.	130
	Moyenne	3-juil.	111
Saroudia	Minimum	25-juin	90
	Maximum	3-août	120
	Moyenne	5-juil.	105