

UNIVERSITE DE OUAGADOUGOU

N° d'ordre :

UNITE DE FORMATION ET DE RECHERCHE
EN SCIENCES DE LA VIE ET DE LA TERRE

LABORATOIRE DE BIOLOGIE ET ECOLOGIE VEGETALES



THESE

Présentée pour obtenir le titre de
DOCTEUR DE L'UNIVERSITE DE OUAGADOUGOU,
Spécialité : Sciences Biologiques Appliquées
Option : Biologie et Ecologie Végétales
par

Georges ZOMBOUDRE

Sur le thème



**CARACTERISATION BIOPHYSIQUE ET INCIDENCE DES PARCS A
VITELLARIA PARADOXA GAERTN. ET FAIDHERBIA ALBIDA (DEL.) A. CHEV.
SUR LES FACTEURS PEDOCLIMATIQUES ET LA PRODUCTIVITE DU
MAÏS (ZEA MAYS L.) DANS LA ZONE OUEST DU BURKINA FASO**

Soutenue le 14 février 2009 devant la Commission d'Examen :

Président : SAADOU Mahamane, Professeur, Université Abdou Moumouni de Niamey

Membres : GUINKO Sita, Professeur, Université de Ouagadougou

MILLOGO/RASOLODIMBY Jeanne, Maître de Conférences, Université de Ouagadougou

SOME Léopold, Maître de Recherche, CNRST Ouagadougou

DEMBELE Youssouf, Maître de Recherche, CNRST Ouagadougou

Remerciements

Ce travail est le fruit des efforts de ceux qui ont cru et contribué à son aboutissement. Aussi, qu'il me soit permis d'exprimer toute ma reconnaissance à l'Agence suédoise pour la coopération et le développement international (ASDI) pour l'assistance financière à travers le programme de renforcement des capacités entre le CNRST et les Universités suédoises, qui a permis de couvrir tous les travaux et séjours en Suède. En particulier, je voudrais adresser mes sincères remerciements à Monsieur le Professeur GUINKO Sita qui a bien voulu diriger mes travaux. Depuis son accueil au sein du laboratoire de Biologie et Ecologie Végétales (UFR/SVT) jusqu'à la rédaction de ma thèse, il m'a guidé et appuyé avec beaucoup de disponibilité et de patience.

Au CNRST et à l'INERA pour m'avoir accordé, pendant ces années, les facilités administratives et l'appui scientifique indispensables à la conduite de mes travaux.

Aux Drs HIEN Victor, responsable du volet n° 4 du projet ASDI/SAREC et SOME Léopold qui n'ont ménagé aucun effort pour assurer mon encadrement sur le terrain et suivre avec un grand intérêt le déroulement de mes travaux.

Au Professeur MILLOGO/RASOLODIMBY Jeanne, pour sa disponibilité et ses conseils tout au long de ces années.

Aux Drs TRAORE Ouola et SOME N. Antoine qui m'ont apporté un appui méthodologique précieux au début de cette tâche.

Aux Drs SEDOGO P. Michel, LOMPO François et OUATTARA Badiori, pour leur constante disponibilité, leurs suggestions et l'intérêt accordé à mon travail.

Au Dr DEMBELE Youssef qui m'a fait part de ses conseils et commentaires critiques.

Je voudrais par ailleurs exprimer ma gratitude aux autorités coutumières et aux exploitants du terroir de Dossi pour leur accueil et leur participation très constructive aux travaux de recherche en "milieu réel". Ma reconnaissance va particulièrement à GNOUMOU Tata et au regretté KOBIE Pierre qui ont été de tous les relevés de terrain, mises en place et suivis d'expérimentation. Je remercie le staff de la SOFITEX à Houndé pour l'accueil et l'hébergement à la ferme semencière de Boni. Je tiens à y associer BAZIE Hugues, TIENDREBEOGO Thomas et mes collègues des laboratoires "Eau-Sol-Plante" à Kamboinsé et "Physique des sols" à Saria qui n'ont jamais ménagé leurs efforts pour collecter des données sur le terrain et analyser mes échantillons.

Une mention spéciale va à GNANKAMBARY Zacharia, mon ami et associé aventurier qui s'est occupé de la chimie et la biologie des sols. Merci pour la collaboration et le soutien qui nous ont permis de surmonter les difficultés du terrain.

En Suède, je remercie très sincèrement Dr Anders MALMER et ses collaborateurs Drs Gert NYBERG et Ulrik ILSTEDT pour l'encadrement scientifique et l'assistance personnelle qu'ils m'ont apporté tout au long de ces années. Au staff du Département de l'Ecologie et de Gestion Forestières de l'Université d'Umeå, je suis reconnaissant pour toutes les facilités dont j'ai bénéficié pendant mon séjour de formation. Je remercie également tous mes compatriotes et amis du Burkina Faso, Kajsa, Mats, Ilva, Sabine, Didier, Patrice, Pascaline, Issa, Souleymane, Korodjouma, Djibril, Amadou, Léonie qui m'ont soutenu matériellement et moralement pendant ce séjour.

Je suis très sensible à l'honneur que les membres du jury me font en acceptant de consacrer une partie de leur temps à examiner ce travail. Puis-je leur en être reconnaissant. Enfin, je remercie très vivement toute ma famille et plus particulièrement mon épouse Odette et nos deux enfants Christiane et Félicia qui ont accepté de subir mes absences répétées. Votre soutien moral a été pour moi une source permanente de réconfort dans les moments difficiles.

TABLE DES MATIERES

Remerciements	i
Résumé	x
Abstract	xi
Liste des sigles et abreviations	vi
Liste des figures, tableaux et annexes	vii

INTRODUCTION GENERALE	1
-----------------------------	---

CHAPITRE I : LE MILIEU NATUREL	5
--------------------------------------	---

1. LE SITE D'ETUDE ET SON ENVIRONNEMENT	6
---	---

1.1. LE CLIMAT	7
----------------------	---

1.2. LES SOLS	8
---------------------	---

1.3. LES FORMATIONS VEGETALES.....	9
------------------------------------	---

1.4. LES MODES D'UTILISATION DES TERRES	10
---	----

2. <i>Faidherbia albida</i> (Del.) A. Chev.	12
--	----

2.1. DESCRIPTION BOTANIQUE.....	12
---------------------------------	----

2.2. REPARTITION GEOGRAPHIQUE ET ECOLOGIE	14
---	----

2.3. FONCTIONS ET USAGES	15
--------------------------------	----

3. <i>Vitellaria paradoxa</i> Gaertn.	16
--	----

3.1. DESCRIPTION BOTANIQUE.....	16
---------------------------------	----

3.2. REPARTITION GEOGRAPHIQUE ET ECOLOGIE	17
---	----

3.3. FONCTIONS ET USAGES	17
--------------------------------	----

4. <i>Zea mays</i> L.	18
----------------------------	----

4.1. CARACTERISTIQUES BOTANQUES ET AGRONOMIQUES	18
---	----

4.2. ECOLOGIE.....	19
--------------------	----

4.3. LES EFFETS DU DEFICIT HYDRIQUE SUR LE MAÏS	20
---	----

CONCLUSION PARTIELLE	22
----------------------------	----

CHAPITRE II : IMPACT DE LA LITIERE FOLIAIRE DES DEUX ESPECES AGROFORESTIERES SUR LA MATIERE ORGANIQUE DU SOL DANS LES AGROSYSTEMES.....	23
---	----

INTRODUCTION	24
--------------------	----

1. MATERIEL ET METHODES	25
-------------------------------	----

1.1. MESURES MORPHOLOGIQUES DES ARBRES.....	25
---	----

1.2. COLLECTEURS DE LA LITIERE	25
--------------------------------------	----

1.3. QUANTIFICATION DE LA LITIÈRE	27
1.4. ANALYSES CHIMIQUES DU SOL	28
1.5. ANALYSES CHIMIQUES DES FEUILLES SENESCENTES	28
2. RESULTATS ET DISCUSSION.....	28
2.1. CARACTERISTIQUES MORPHOLOGIQUES DES ARBRES.....	28
2.2. PRODUCTION DE LA LITIÈRE FOLIAIRE DE FAIDHERBIA.....	31
2.3. PRODUCTION DE LA LITIÈRE FOLIAIRE DU KARITE	32
2.4. ANALYSES CHIMIQUES DES FEUILLES SENESCENTES	33
2.5. ANALYSES CHIMIQUES DU SOL	34
CONCLUSION PARTIELLE	35

CHAPITRE III : INFLUENCE DES DEUX ESPECES AGROFORESTIERES SUR L'INFILTRABILITE DES SOLS DANS LES AGROSYSTEMES

INTRODUCTION	37
1. MATERIEL ET METHODES	38
1.1. L'INFILTRABILITE DU SOL	38
1.1.1. Définition.....	38
1.1.2. Théorie	38
1.2. CARACTERISTIQUES STRUCTURALES DU SOL ET INFILTRABILITE	41
1.2.1. Caractérisation physique du sol.....	41
1.2.2. Macroporosité du sol et infiltrabilité	41
1.3. PLUVIOSITE ET INFILTRABILITE DU SOL	42
1.4. LES TESTS D'INFILTRATION	43
1.4.1. Dispositif des tests.....	43
1.4.2. Analyse statistique.....	44
2. RESULTATS ET DISCUSSION.....	45
2.1. CARACTERISTIQUES PHYSIQUES DU SOL	45
2.2. EFFETS DES TRAITEMENTS SUR L'INFILTRABILITE DU SOL	46
2.3. RELATION ENTRE LA POROSITE ET L'INFILTRABILITE DU SOL.....	50
2.4. RELATION ENTRE L'INTENSITE DES PLUIES ET L'INFILTRABILITE DU SOL	53
CONCLUSION PARTIELLE	55

CHAPITRE IV : INFLUENCE DES DEUX ESPECES AGROFORESTIERES SUR LA DYNAMIQUE DE L'EAU DANS LE SOL ET LA PRODUCTIVITE DES CULTURES DANS LES AGROSYSTEMES

INTRODUCTION	57
1. MATERIEL ET METHODES	58
1.1. DISPOSITIF EXPERIMENTAL	58
1.2. MISE EN PLACE DE LA CULTURE.....	59
1.3. COLLECTE DES DONNEES CLIMATIQUES.....	59
1.4. EVAPOTRANSPIRATION	60
1.5. HUMIDITE DU SOL.....	64
1.6. CROISSANCE DES PLANTS DU MAÏS	66
1.6.1. La hauteur des plants	66

1.6.2. <i>L'indice de surface foliaire</i>	66
1.7. NUTRITION MINERALE DU MAÏS	66
1.8. PRODUCTIVITE.....	67
2. RESULTATS ET DISCUSSION.....	67
2.1. CLIMAT	67
2.1.1. <i>La pluviométrie</i>	67
2.1.2. <i>La température de l'air</i>	68
2.1.3. <i>L'évapotranspiration potentielle</i>	68
2.1.4. <i>L'humidité relative de l'air</i>	70
2.1.5. <i>Le vent</i>	70
2.2. HUMIDITE DU SOL.....	73
2.3. CROISSANCE DES PLANTS DU MAÏS	74
2.4. NUTRITION MINERALE DU MAÏS	79
2.5. PRODUCTIVITE.....	81
CONCLUSION PARTIELLE	89
CONCLUSION GENERALE	90
REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES	93
ANNEXES	104

Liste des sigles et abréviations

ASDI/SAREC	:	Agence Suédoise de Coopération pour le Développement International
BUNASOL	:	Bureau National des Sols
C	:	Carbone
C/N	:	Rapport Carbone sur Azote
CNRST	:	Centre National de la Recherche Scientifique et Technologique
CTFT	:	Centre Technique Forestier Tropical
Da	:	Densité apparente
ddl	:	degré de liberté
DEO	:	Direction est-ouest
DGPSA	:	Direction Générale des Prévisions et des Statistiques Agricoles
DNS	:	Direction nord-sud
EMJ ⁻¹	:	Energie par Mégajoule
Etm	:	Ecart-type de la moyenne
ETP	:	Evapotranspiration Potentielle
ET ₀	:	Evapotranspiration de référence
FAO	:	Organisation des Nations Unies pour l'Alimentation et l'Agriculture.
FIT	:	Front intertropical
HR	:	Humidité Relative
IF	:	Indice Foliaire
INERA	:	Institut de l'Environnement et de Recherches Agricoles
kPa	:	Kilopascal
MJ	:	MégaJoule
MLG	:	Modèle Linéaire Générale
MO	:	Matière Organique
N	:	Azote
P	:	Phosphore
PAR	:	Rayonnement Photosynthétiquement Actif
pH	:	Potentiel hydrogène
R	:	Rayon
SF	:	Surface Foliaire
SOFITEX	:	Société Burkinabè des Fibres Textiles
TVE	:	Teneur Volumique en Eau
UFR/SVT	:	Unité de Formation et de Recherche en Sciences de la Vie et de la Terre
USDA	:	Agriculture Department of United States

Liste des figures, tableaux et annexes

<u>Figures</u>	<u>Pages</u>
Figure 1. Situation géographique du site d'étude de Dossi, Burkina Faso.	6
Figure 2. Carte phytogéographique du Burkina Faso indiquant le climat du site d'étude (adapté de FONTES et GUINKO, 1995)	7
Figure 3. Les unités morphopédologiques de la zone des parcs à <i>Faidherbia</i> et à karité du terroir de Dossi, Burkina Faso (adapté de DEPOMMIER, 1996).	9
Figure 4. Illustrations botaniques de <i>Faidherbia albida</i> (adapté de CTFT, 1989)	14
Figure 5. Illustrations botaniques de <i>Vitellaria paradoxa</i> (adapté de DELOLME, 1947).	17
Figure 6. Les différentes parties du maïs. A, plante ; B, inflorescence mâle (panicule) ; C, épillets mâles ; D, épillet mâle (coupe longitudinale) ; E, inflorescence femelle (coupe longitudinale) ; F, épillet femelle (coupe longitudinale) ; G, épi ; H, caryopse (grain) (Adapté de PURSEGLOVE, 1972)	20
Figure 7. Disposition des collecteurs de la litière foliaire sous les arbres à Dossi, Burkina Faso. R = rayon du houppier	26
Figure 8. Vue d'un dispositif de collecteurs de la litière foliaire sous un karité (a) à Dossi, (Burkina Faso) et détails du collecteur (b).	26
Figure 9. Distribution et fréquence des classes de hauteur de <i>Faidherbia</i> et du karité dans les parcs agroforestiers de Dossi, Burkina Faso.	30
Figure 10. Distribution et fréquence des classes de circconférence de <i>Faidherbia</i> et du karité dans les parcs agroforestiers de Dossi, Burkina Faso.	30
Figure 11. Distribution et fréquence des classes de surface du houppier de <i>Faidherbia</i> et du karité dans les parcs agroforestiers de Dossi, Burkina Faso.	30
Figure 12. Dispositifs de mesure de l'infiltrabilité du sol. Infiltromètre à double anneau (a) et à disque (b).	39
Figure 13. Evolution en fonction du temps de l'infiltrabilité du sol, sous et hors houppier des arbres dans les parcs à <i>Faidherbia</i> (a) et à karité (b). Dossi, Burkina Faso.	47
Figure 14. Fréquence de l'infiltrabilité mesurée sous et hors houppier des arbres dans les parcs à karité et à <i>Faidherbia</i> . Dossi, Burkina Faso.	48
Figure 15. Relation entre la matière organique et l'infiltrabilité du sol, sous et hors houppier des arbres dans les parcs à <i>Faidherbia</i> (a) et à karité (b). Dossi, Burkina Faso.	50
Figure 16. Infiltrabilité du sol aux potentiels 0, -5 et -10 cm, sous et hors houppier des arbres dans les parcs à <i>Faidherbia</i> (a) et à karité (b). Dossi, Burkina Faso.	52
Figure 17. Distribution de l'intensité des pluies (mm h^{-1}) exprimée en fonction du pourcentage de la pluviométrie annuelle de 2004, 2005 et 2006 et de la durée effective des pluies de ½ h, 1h et 2 h. Dossi, Burkina Faso.	54
Figure 18. Aperçu partiel du dispositif expérimental dans un parc à karité à Dossi, Burkina Faso.	61
Figure 19. Station météorologique automatique du site d'étude de Dossi, Burkina Faso.	63
Figure 20. Réflectomètre de teneur en eau CS616	65
Figure 21. Températures moyennes mensuelles minimales et maximales de l'air, hauteur mensuelle des pluies en 2004, 2005 et 2006, et moyennes interannuelles de 1985 à 2000, Dossi, Burkina Faso.	69
Figure 22. Valeurs moyennes mensuelles de l'ETP et de l'humidité relative de l'air des saisons 2004, 2005 et 2006 comparées à celles de la période 1985-2000 dans le village de Dossi, Burkina Faso.	71

Figure 23. Comparaison des vitesses moyennes mensuelles des vents au-dessus de 10 m et 2 m du sol à Boromo et à Dossi, Burkina Faso.	72
Figure 24. Relation entre l'ETP ^{PAR} calculé à partir du rayonnement PAR^Q et l'ETP ^{RS} calculé à partir du rayonnement R_s	72
Figure 25. Evolution du Ratio décadaire entre le rayonnement PAR et le rayonnement solaire global (R_s) au cours d'une année à Dossi, Burkina Faso.	73
Figure 26. Evolution après chaque pluie du stock d'eau en dessous de 30 cm du sol, sous et hors houppier du karité et de <i>Faidherbia</i> associés au maïs, en 2005 (a) et 2006 (b), à Dossi, Burkina Faso.	75
Figure 27. Hauteur moyenne (cm) des plants de maïs en fonction de la fumure appliquée sous et hors houppier des arbres dans le parc à <i>Faidherbia</i> . Dossi, Burkina Faso, saison des pluies 2004, 2005 et 2006.	77
Figure 28. Hauteur moyenne (cm) des plants de maïs en fonction de la fumure appliquée sous et hors houppier des arbres dans le parc à karité. Dossi, Burkina Faso, saisons des pluies 2004, 2005 et 2006.	77
Figure 29. Valeurs moyennes de l'indice foliaire du maïs en fonction de la fumure appliquée sous et hors houppier des arbres dans le parc à <i>Faidherbia</i> . Dossi, Burkina Faso, saisons des pluies 2005 et 2006.	78
Figure 30. Valeurs moyennes de l'indice foliaire du maïs en fonction de la fumure appliquée sous et hors houppier des arbres dans le parc à karité. Dossi, Burkina Faso, saisons des pluies 2005 et 2006.	79
Figure 31. Azote total et phosphore total exportés par le maïs en fonction de la fumure appliquée sous et hors houppier des arbres dans le parc à <i>Faidherbia</i> . Dossi, Burkina Faso, saison des pluies 2006. (n = 4).....	82
Figure 32. Azote total et phosphore total exportés par le maïs en fonction de la fumure appliquée sous et hors houppier des arbres dans le parc à karité. Dossi, Burkina Faso, saison des pluies 2006. (n = 4)	83
Figure 33. Rendement moyen du maïs en fonction de la fumure appliquée sous et hors houppier des arbres dans le parc à <i>Faidherbia</i> . Dossi, Burkina Faso, saisons des pluies 2004, 2005 et 2006. (n = 4)	84
Figure 34. Rendement moyen du maïs en fonction de la fumure appliquée sous et hors houppier des arbres dans le parc à karité. Dossi, Burkina Faso, saisons des pluies 2004, 2005 et 2006. (n = 4)	85
Figure 35. Taux de remplissage des épis de maïs en fonction de la fumure appliquée sous et hors houppier des arbres dans les parcs à <i>Faidherbia</i> (a) et à karité (b). Dossi, Burkina Faso, saisons des pluies 2004, 2005 et 2006.	86

Tableaux

Tableau I. Caractéristiques morphologiques des arbres sélectionnés pour la collecte de la litière foliaire.	27
Tableau II. Quantité de litière annuelle produite par les <i>Faidherbia</i> à Dossi, Burkina Faso .	31
Tableau III. Quantité de litière annuelle produite par les karités à Dossi, Burkina Faso	32
Tableau IV. Teneur initiale des éléments nutritifs dans la litière foliaire de <i>Faidherbia</i> et du karité à Dossi, Burkina Faso.	33
Tableau V. Caractéristiques chimiques de l'horizon 0-10 cm du sol, sous et hors houppier de <i>Faidherbia</i> et du karité à Dossi, Burkina Faso.....	35

Tableau VI. Caractéristiques physiques du sol, sous et hors houppier de <i>Faidherbia</i> et du karité à Dossi, Burkina Faso. Les chiffres entre parenthèses représentent la déviation standard.	45
Tableau VII. Propriétés hydrodynamiques du sol mesurées sous et hors houppier de <i>Faidherbia</i> et du karité à Dossi, Burkina Faso.....	46
Tableau VIII. Contribution des composantes du système macro-poral à l'écoulement de l'eau.....	51
Tableau IX. Valeurs de <i>F</i> et degré de signification de l'analyse de variance comparant la hauteur moyenne des plants de maïs dans les parcs à <i>Faidherbia</i> et à karité. Dossi, Burkina Faso, saisons des pluies 2004, 2005 et 2006. (n = 32)	76
Tableau X. Valeurs de <i>F</i> et degré de signification de l'analyse de variance comparant le rendement grain du maïs dans les parcs à <i>Faidherbia</i> et à karité. Dossi, Burkina Faso, saisons des pluies 2004, 2005 et 2006. (n = 32).....	84
Tableau XI. Valeurs de <i>F</i> et degré de signification de l'analyse de variance comparant le taux de remplissage des épis de maïs dans les parcs à <i>Faidherbia</i> et à karité. Dossi, Burkina Faso, saisons des pluies 2004, 2005 et 2006. (n = 32)	87

Annexes

Annexe 1 : Fiche technique de la variété du maïs SR 21 (SANOU, 1993)	105
Annexe 2 : Caractéristiques morphologiques des arbres dans les parcs à karité et à <i>Faidherbia</i> du site d'expérimentation	107
Annexe 3 : Programmation de la centrale d'acquisition (CR 10X) de la station météo de Dossi, Burkina Faso	110
Annexe 4 : Description de l'instruction 138.....	115
Annexe 5 : Valeur de la constante α pour différentes textures du sol (MAHIEU ET PIELTAIN, 1998).....	116
Annexe 6 : Publications scientifiques	117

Résumé

Les pratiques agroforestières traditionnelles ou améliorées visent la stabilité et la durabilité des systèmes de production agricole. Dans le but d'évaluer l'impact de ces pratiques sur les conditions biophysiques du sol, le microclimat et la productivité des cultures, une étude comparative de deux espèces communes des parcs agroforestiers, *Vitellaria paradoxa* Gaertn. (karité) et *Faidherbia albida* (Del.) A. Chev., associées à des amendements organiques et minéraux sur une culture du maïs (*Zea mays* L.), a été conduite dans la zone ouest du Burkina Faso. La litière foliaire des arbres, la matière organique et l'humidité du sol, l'infiltration de l'eau, la croissance, la nutrition minérale et la productivité du maïs ont été évaluées dans les zones situées sous et en dehors du houppier des arbres en relation avec les paramètres climatiques.

La production de la litière foliaire a été relativement plus élevée dans le parc à *V. paradoxa* que dans celui du *F. albida*. Le taux de matière organique du profil cultural sous le houppier atteignait 1,5 fois le taux obtenu en dehors du houppier des arbres. La disponibilité en eau du sol s'est révélée plus élevée sous le houppier des arbres dans les deux parcs, à cause d'un effet d'ombrage plus excessif au voisinage du karité que du *Faidherbia* mais aussi de l'amélioration de l'infiltrabilité du sol dont la moyenne a été de 53 mm h^{-1} sous le houppier et de 40 mm h^{-1} en dehors du houppier des arbres. Le suivi des intensités de pluies a montré que près de 35 % des précipitations annuelles tombent avec une intensité $\geq 40 \text{ mm h}^{-1}$.

Les amendements organiques et minéraux n'ont pas significativement affecté l'infiltration de l'eau dans le sol. La température et l'humidité de l'air dans le parc à *Faidherbia* ont été très peu différentes des valeurs obtenues en absence d'arbre mais la vitesse du vent était très élevée. Le rendement du maïs sous le houppier du *F. albida* atteignait 2,3 fois le rendement obtenu en dehors du houppier, tandis que sous le houppier du karité, il était de 0,6 à 0,8 fois le rendement obtenu en dehors du houppier. Le rendement du maïs n'a pas varié du fait de l'application de l'urée, du compost, ou de leur combinaison. Cependant, au cours des années de sécheresse, le rendement est relativement meilleur sous le houppier.

Les exportations en azote et en phosphore par le maïs ont été meilleures sous le houppier du *Faidherbia* et en dehors du houppier du karité.

En conclusion, les modifications des propriétés du sol et du microclimat dues à la présence des arbres dans les champs agricoles peuvent contribuer à améliorer la productivité des cultures. L'application du compost, associé à l'engrais minéral, offre un mode de gestion moins onéreux de la fertilité des sols dans les agro-écosystèmes.

Mots-clés : Burkina Faso, *F. albida*, matière organique du sol, infiltrabilité, *Zea mays*, microclimat, productivité, *V. paradoxa*, nutrition minérale

Biophysical characterization of *Vitellaria paradoxa* Gaertn. and *Faidherbia albida* (Del.) A. Chev. parklands and the effect on pedoclimatic factors and maize (*Zea mays* L.) productivity in the Western Area of Burkina Faso.

Abstract

Traditional or improved agroforestry practices are designed with the aim of sustaining agricultural systems and maintaining site stability. We have examined the effect of *Faidherbia albida* and *Vitellaria paradoxa* trees, and additions of inorganic fertilizer, leaves and compost on improving soil biophysical properties, microclimate and crop production in two agroforestry parkland systems in the western part of Burkina Faso. Litter production, soil moisture and organic matter, water infiltration and maize (*Zea mays* L.) performance were measured both under and outside canopies of these trees with respect to the climate parameters.

The results show that leaves litter production was higher in the *Vitellaria paradoxa* parkland than in the *Faidherbia albida* parkland. Organic matter of the cultivated soil profile under the canopies was up to 1.5 times the organic matter outside the canopies. The soil water content was increased under the canopies of both agroforestry parkland systems due to shading more intense closer to *V. paradoxa* than *F. albida* and improving water infiltrability. The average steady state infiltrability outside and under canopies was 40 and 53 mmh⁻¹ respectively.

The compost, leaves and inorganic fertilizer did not improve infiltrability significantly during the study period. Rain intensity measurements collected over three years at 30 min intervals showed that up to 35% of the annual precipitation fell with intensities $\geq 40 \text{ mm h}^{-1}$. Air temperature and relative humidity within *F. albida* trees differed little from values in the open fields but wind speed was substantially higher. The maize yield under the canopies of *F. albida* was up to 2.3 times the yield outside the canopies, while under the canopies of *V. paradoxa* it was 0.6 to 0.8 times the yield outside the canopies. The yield under the canopy was relatively better in dry year. Maize yield was similar with the addition of urea, compost, or a combination of compost and urea, if applied at an equivalent N-content. Uptake of nutrients by maize was performed better under the canopy of *F. albida* and outside the canopy of *V. paradoxa*. In conclusion, crop production could be improved through the change of soil properties and microclimate conditions by managing trees appropriately in agroforestry systems. Addition of combined compost and inorganic fertilizer seems to be a suitable option for farmers to improve soil quality.

Keywords: Burkina Faso, *F. albida*, Soil organic matter, Infiltrability, Maize, Microclimate, Yields, *V. paradoxa*, nutrient uptake

INTRODUCTION GENERALE

Au Burkina Faso l'agriculture constitue la principale activité économique. Ce secteur occupe 90 % de la population active totale, procure 50 % des recettes d'exportation, et contribue pour 40 % au produit intérieur brut (DGPSA, 2005). L'agriculture est largement dominée par les cultures pluviales dont les plus importantes en production restent le sorgho (1 609 000 tonnes), le mil (1 184 000 tonnes) et le maïs (665 000 tonnes). Ces trois céréales constituent également la base de l'alimentation de la population.

Selon les estimations de la F.A.O (2000), près de 2,9 millions d'hectares de terre sont mis en culture chaque année au Burkina Faso. Le maïs occupe 10 à 15 % de cette superficie et représente 22 % de la production nationale.

Dans le Bassin cotonnier du Burkina, l'agriculture est caractérisée par un système de culture à base de coton et de céréales où le coton vient en tête de rotation. La production cotonnière connaît un accroissement important ces dernières années en passant de 151 000 tonnes en 1995 à 500 000 tonnes en 2003 (DGPSA, 2005). De par son importance, la culture du coton bénéficie de plus d'intrants agricoles qui sont alloués aux producteurs sous forme de crédit par les firmes cotonnières. Dans ce système de culture, le maïs succède à la culture du coton et profite ainsi de l'arrière effet des engrais appliqués sur le coton. Cette céréale occupe une place importante dans la zone avec une production de 279 000 tonnes pour une superficie totale d'environ 160 000 ha (DGPSA, 2005). Le sorgho, moins exigeant en engrais, apparaît généralement en fin de rotation. Cet assolement préconisé par les services agricoles est très irrégulièrement appliqué. La distribution spatiale des successions fait ressortir une céréaliculture continue incorporant une à deux années de coton. L'application des fumures organiques et minérales montre que les quantités utilisées sont assez disparates d'une saison à l'autre et insuffisantes pour couvrir les besoins des cultures.

Des engrais chimiques sont prélevés sur les quantités destinées au coton pour être appliqués sur le maïs (DEPOMMIER, 1996). Ainsi, le coton comme le maïs, partiellement fumé, ne produira pas assez pour permettre le remboursement des intrants et équipements acquis à crédit. Les producteurs, préoccupés donc par ce crédit, vont chercher à étendre les surfaces cultivées par la mécanisation afin d'augmenter les productions et de tirer le maximum de revenus. Cette extension se fait au détriment des jachères. Les cultures deviennent quasi permanentes ou alternent parfois avec une jachère herbeuse (DEVINEAU *et al.*, 1997). L'adoption de ces pratiques culturales à faible apport d'intrants contribue à accentuer le déséquilibre des bilans minéraux et le déclin des rendements agricoles. En outre, le labour annuel des champs dicté par la rotation coton-céréales, tout comme l'exportation des

résidus de récolte à des fins domestiques, conduit inéluctablement à une dégradation progressive de la structure du sol, à l'érosion et à la baisse de la matière organique du sol (LAL, 1989b; BADO *et al.*, 1997; OUEDRAOGO *et al.*, 2001; OUATTARA *et al.*, 2006). Pour améliorer la productivité des zones agricoles à risque et assurer une certaine stabilité de la production, il est nécessaire de promouvoir au niveau du paysan, d'une part, l'utilisation et la maîtrise des facteurs de production et d'autre part, une gestion raisonnée des ressources disponibles.

Si l'application des engrais minéraux permet d'obtenir de meilleurs rendements, leur coût n'est pas à la portée des producteurs et leur efficacité reste limitée dans le temps à cause de la diminution des bases échangeables et de l'acidité du sol (BADO *et al.*, 1997). Une autre alternative, peu coûteuse et plus accessible aux producteurs, reste l'utilisation de technologies à travers un recyclage approprié de la biomasse produite par les composantes des systèmes agroforestiers, en occurrence l'association arbre-plante cultivée. La présence des arbres au milieu des cultures crée des paysages appelés parcs ou « paysages agrosylvicoles ».

Il s'agit d'un système traditionnel d'utilisation des terres qui associe l'arbre et les cultures dans un arrangement spatial aléatoire (SINCLAIR, 1999; BOFFA, 2000). L'avantage de l'intégration de l'arbre dans les systèmes de production a été souligné par plusieurs auteurs (MAIGA, 1987; BOFFA, 1995; NYBERG et HÖGBERG, 1995; JONSSON *et al.*, 1999).

Ainsi, sous le houppier de *Faidherbia albida* (Del.) A. Chev., le rendement grain des céréales peut connaître un accroissement de 100 à 120 % et celui de la matière sèche de 50 à 100 % pour le sorgho (DEPOMMIER, 1996). L'utilisation des émondes de karité (*Vitellaria paradoxa* Gaertn.) comme mulch permet également d'augmenter le rendement grain du mil de 120 % et les matières sèches de 43 % à cause de l'amélioration de la perméabilité et de la teneur en carbone du sol (BAYALA *et al.*, 2003). Selon SANCHEZ (1995), la biomasse produite par les arbres peut atteindre 6 tonnes ha⁻¹ an⁻¹ et la décomposition d'une partie de cette biomasse constitue une source importante de matières organiques pour le sol et d'éléments nutritifs pour les cultures associées. Cet apport organique, auquel s'ajoutent les pluvio-lessivats et les excréments des animaux en pâturage sous les arbres (BELSKY *et al.*, 1989), contribue à promouvoir l'activité biologique des sols (YOUNG, 1995) et à améliorer les propriétés physiques et chimiques du profil cultural (TRAORE *et al.*, 2004). Des effets similaires ont été observés avec l'apport de la fumure organique issue des étables d'animaux et des fosses fumières (OUEDRAOGO *et al.*, 2001). RHOADES (1997) souligne toutefois que l'amélioration des rendements agricoles par la pratique de l'agroforesterie serait aussi le résultat des effets combinés de l'arbre sur le microclimat.

En effet, dans les régions tropicales, la végétation modifie considérablement les profils de vitesse du vent, la température de l'air et l'humidité atmosphérique. Les précipitations sous le feuillage sont généralement moins agressives pour le sol et les cultures associées (BREMAN et KESSLER, 1995; DIAKITE, 1995; JONSSON, 1995; BOFFA, 2000). C'est dans le but de mieux comprendre et d'expliquer les interfaces arbre-sol-culture dans les formations végétales que nous avons entrepris les travaux de recherche sous le thème « Caractérisation biophysique et incidence des parcs à *V. paradoxa* et *F. albida* sur les facteurs pédoclimatiques et la productivité du maïs dans la zone ouest du Burkina Faso ». Ces travaux qui se rapportent à une évaluation agronomique des parcs agroforestiers, visent à montrer davantage l'intérêt d'utiliser ces parcs comme moyen naturel complémentaire pour améliorer la fertilité des sols et garantir un bon niveau de productivité des céréales. De façon spécifique, il s'agit d'évaluer d'une part, les effets des parcs sur le microclimat et la conservation de la matière organique du sol et d'autre part, les effets combinés des ligneux et de la fertilisation organo-minérale sur les caractéristiques physiques et chimiques du sol, la nutrition minérale et la productivité du maïs.

La présente thèse s'articule autour de quatre grands chapitres. Le premier chapitre décrit l'environnement du site d'étude et traite des généralités sur le karité et le *Faidherbia* qui sont deux espèces dominantes des parcs agroforestiers du site et sur le maïs qui est la principale céréale cultivée dans ces espaces agraires. Le second chapitre présente une analyse qualitative et quantitative des apports de ces deux espèces pour le maintien de la matière organique du sol. Le troisième chapitre décrit le rôle de ces apports et de certaines pratiques culturales sur l'amélioration des caractéristiques hydrodynamiques des sols. L'influence des ligneux sur le microclimat, la disponibilité en eau du sol, la nutrition minérale et sur la productivité du maïs, est abordée dans le quatrième chapitre. Dans les deux derniers chapitres, les résultats et la discussion sont présentés dans des situations de présence ou d'absence de l'influence du houppier des arbres. Un bilan global et comparatif du comportement des cultures et de l'évolution des facteurs biophysiques dans les parcs étudiés, assorti des perspectives, est établi en conclusion.

CHAPITRE I

Le milieu naturel

1. Le site d'étude et son environnement

L'étude a été réalisée dans le village de Dossi, localité située dans la partie Ouest du Burkina à environ 245 km de Ouagadougou sur l'axe routier Ouagadougou-Bobo Dioulasso. Le village s'inscrit dans le département de Boni et dans la Province du Tuy dont le chef lieu est la commune urbaine de Houndé. Le terroir de Dossi couvre une superficie de plus de 250 km² et s'étend entre 3° 17' et 3° 30' de longitude ouest et 11° 22' et 11° 30' de latitude nord.

Situé à 350 m d'altitude, le village est adossé au pied d'une chaîne de buttes et de collines rocheuses d'origine birrimienne qui traversent du nord au sud le terroir et culminant à certains endroits à plus de 450 m d'altitude (figure 1).

Ce vaste terroir est aujourd'hui contesté dans ses marges, au nord-est par les exploitants du village de Banhoun et à l'ouest par ceux du village de Saho. Selon les habitants de Dossi, ces deux villages récemment constitués et administrativement enregistrés, occuperaient plus de 15 % de la superficie du terroir (DEPOMMIER, 1996).

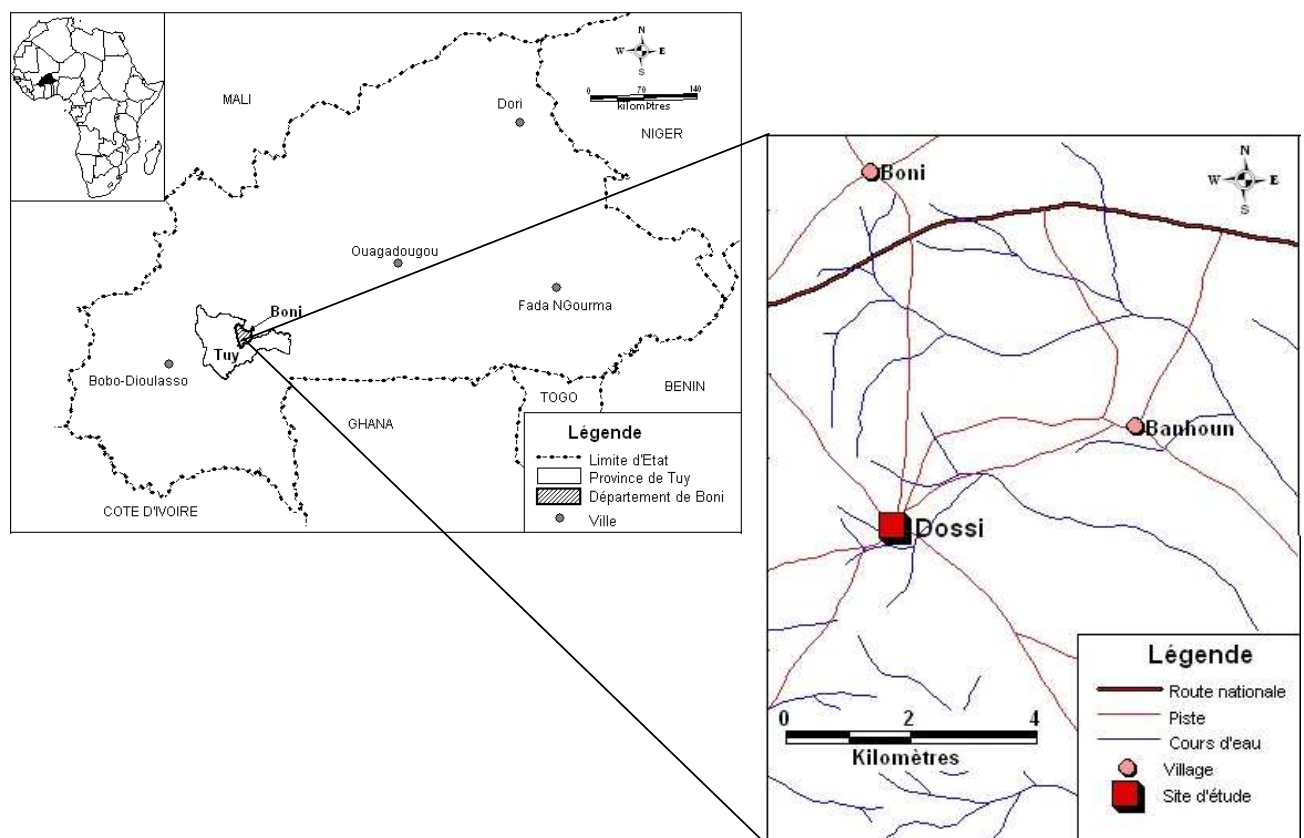


Figure 1. Situation géographique du site d'étude de Dossi, Burkina Faso.

1.1. Le climat

Le village de Dossi est localisé dans le secteur soudanien-sud du Burkina Faso caractérisé par des climats moins xériques (FONTES et GUINKO, 1995). La pluviométrie annuelle qui se situe en moyenne entre 900 et 1000 mm, est répartie sur 60 à 90 jours de pluie (figure 2). Le régime des pluies est unimodal avec une saison sèche et une saison des pluies par an.

La saison des pluies débute en avril, avec l'arrivée du Front intertropical (FIT) par le Sud, et finit en Octobre, quand le FIT redescend (SOME, 1989). L'humidité relative de l'air, faible en saison sèche, notamment en janvier-février (de l'ordre de 25 %), augmente ensuite avec la pluviosité, pour atteindre 80 % en août.

Les mois secs vont de novembre à avril et au cours de cette période, les températures maximales varient de 33 à 37 °C, les températures minimales étant de l'ordre de 17 à 25 °C. L'amplitude diurne des températures diminue en saison pluvieuse se situant entre 8 et 13 °C (SIVAKUMAR et GNOUMOU, 1987). L'indice annuel de l'évapotranspiration potentielle est compris entre 0,36 et 0,48 (ROUPSARD *et al.*, 1999).

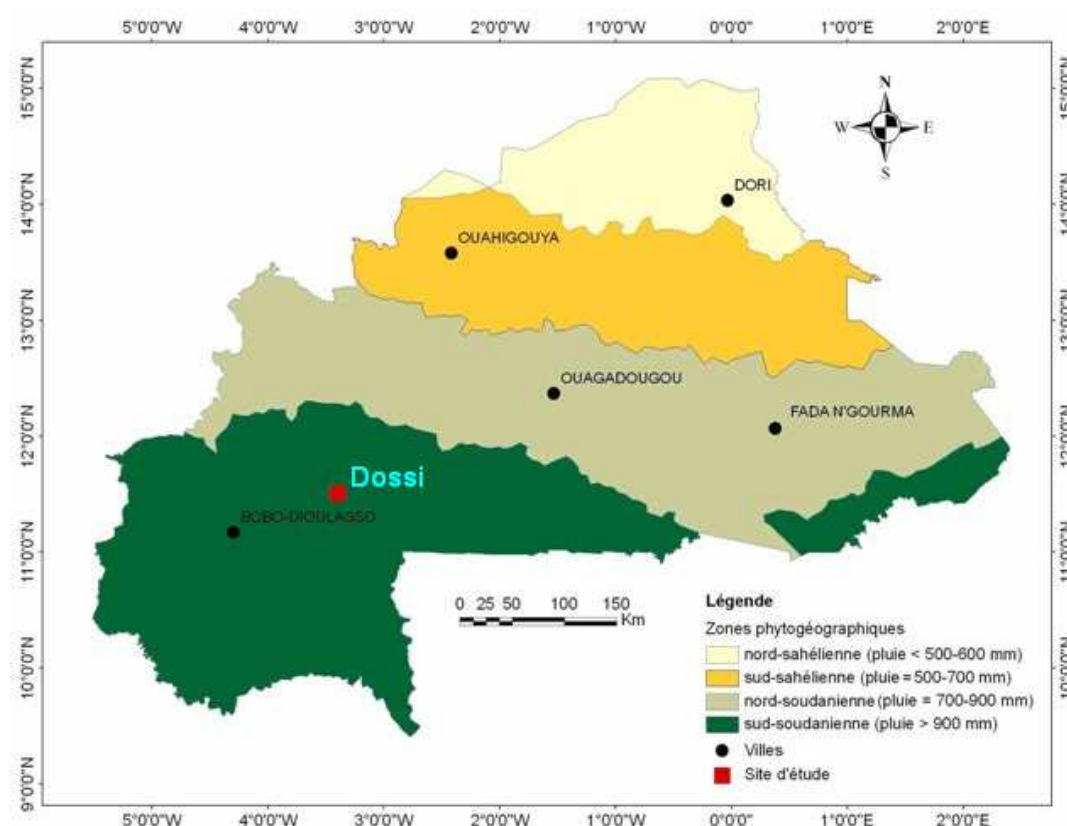


Figure 2. Carte phytogéographique du Burkina Faso indiquant le climat du site d'étude (adapté de FONTES et GUINKO, 1995)

1.2. Les sols

Le terroir de Dossi repose, de part et d'autre des collines birrimiennes, sur des cuvettes allongées qui constituent dans sa partie centrale des dépressions périphériques. Au delà de ces cuvettes se succèdent sur les versants, des glacis et des plateaux à carapace ferrugineuse, résultant de la pénéplanation du socle (figure 3).

Le terroir est caractérisé en aval du bas glacis par des sols bruns eutrophes, plus ou moins hydromorphes. Ils appartiennent à la classe des Chromic Cambisols (FAO, 1988) et sont de couleur brun jaunâtre sombre (10YR4/4¹) en surface et brun olive clair (2,5Y5/6¹) en profondeur.

La fraction granulométrique est dominée par l'argile (30-45 %) et le limon (15-45 %). La texture est limono argileuse (LA) en surface et argileuse (A) en profondeur. La charge graveleuse est importante en surface (40 %) sous forme de recouvrement et faible (5-10 %) en profondeur. Elle est constituée de fragments de quartz et de concrétions ferrugineuses et ferromanganifères. Des taches de type brun jaunâtre (10YR5/8¹) sont visibles en profondeur au niveau du schiste altéré.

Les versants Est et Ouest du site sont caractérisés par des sols appartenant à la classe des Régosols eutriques (FAO, 1988). Le sol est profond d'environ 1 m avec des fragments de quartz sur l'ensemble du profil. La couleur est brun jaunâtre sombre (10YR3/4¹) en surface et brun olive clair (2,5YR3/4¹) en profondeur. La texture est argilo-limoneuse en surface et argileuse dans les horizons de profondeur. La structure est peu massive en surface et massive en profondeur. La charge grossière est faible en surface (20 % de concrétions ferrugineuses) et très importante en profondeur (80 à 90 % de concrétions ferrugineuses et ferromanganifères et de fragments de quartz). Le substratum géologique est constitué par des formations volcano-sédimentaires birrimiennes fissurées et altérées. Leur épaisseur varie de zéro à environ 3,5 m (ROUPSARD *et al.*, 1999).

Sur le haut des versants où la cuirasse affleure, les sols peu à moyennement profonds sont ferrugineux indurés ou ferruginisés. Dans les collines, les sols sont plus superficiels, généralement peu évolués d'érosion lithique. Ils ont une médiocre réserve en eau et une

¹Description normalisée de la couleur des sols de la société Munsell.

médiocre aptitude agronomique bien que la présence du substrat basique leur confère une assez bonne richesse minérale.

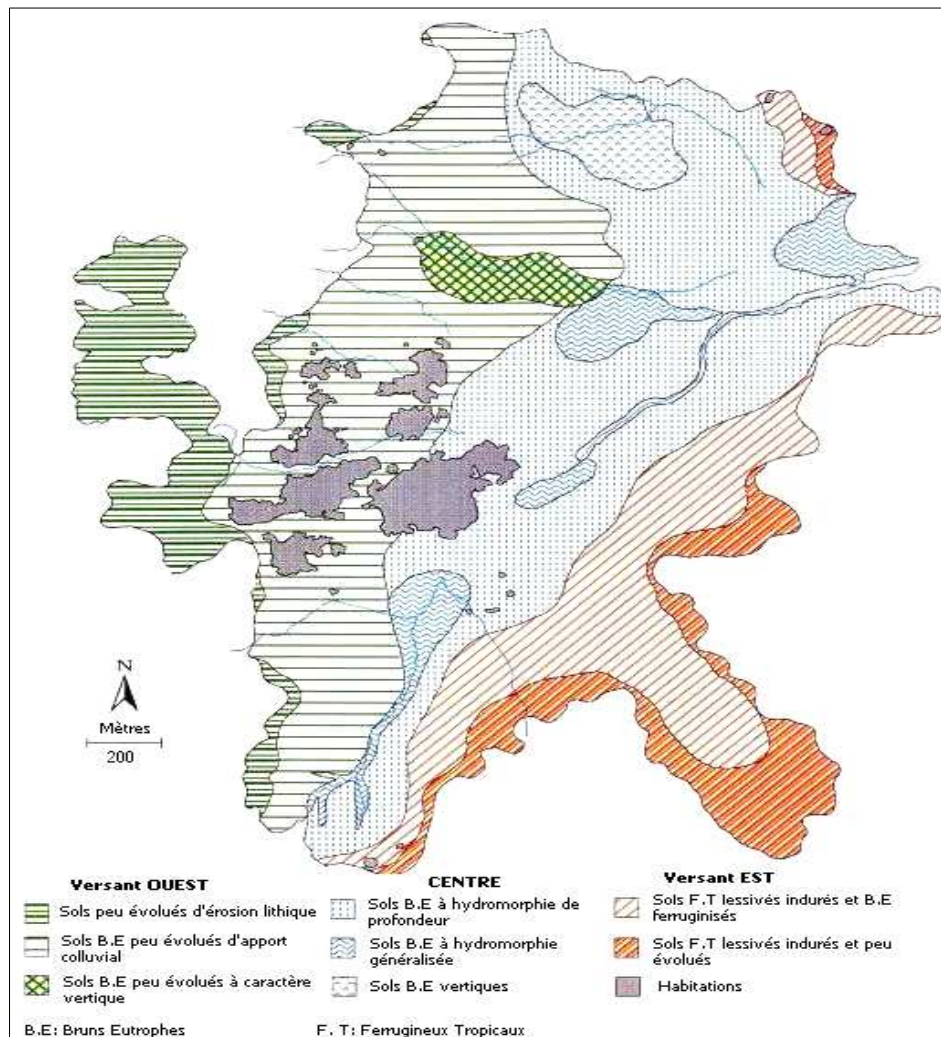


Figure 3. Les unités morphopédologiques de la zone des parcs à *Faidherbia* et à karité du terroir de Dossi, Burkina Faso (adapté de DEPOMMIER, 1996).

1.3. Les formations végétales

La végétation du terroir de Dossi est de type savane arborée plus ou moins dense caractéristique du climat sud-soudanien. Elle présente l'allure de paysages agrestes communément appelés parcs arborés. Ces parcs sont dominés essentiellement par le *Faidherbia* (*Faidherbia albida*), et parfois, localement, par le karité (*Vitellaria paradoxa*).

La composition floristique des parcs est souvent diversifiée et les espèces couramment rencontrées sont entre autres *Lannea microcarpa*, *Tamarindus indica*, *Sclerocarya birrea*, *Parkia biglobosa*, *Detarium microcarpum*, *Terminalia avicennioides*, *Burkea africana*, *Adansonia digitata* et *Entada africana*. Ces espèces sont délibérément protégées dans les

champs à cause de leurs multiples avantages, notamment la production d'aliments et de fourrage et le maintien de la fertilité des sols. Les jachères récentes, les abords de sentiers et les sols fortement érodés sont colonisés par des espèces sahéliennes (GUINKO, 1984) dont : *Cassia tora*, *Cymbopogon schoenanthus*, *Schoenefeldia gracilis*, *Ziziphus mauritiana*.

Les cuirasses qui occupent près de 21 % de la surface du terroir, portent des formations claires plus arbustives qu'arborées (DEPOMMIER, 1996). Celles-ci sont dominées par des Combretaceae (*Combretum ghasalense*) accompagnées de *Acacia macrostachya* et de plages discontinues d'herbacées (*Loudetia togoensis* et *Andropogon spp*).

Sur les glacis prédominent les savanes arborées et localement des forêts claires qui alternent avec des parcs arborés. Des parcs monospécifiques à *Vitellaria paradoxa* et à *Faidherbia albida* prédominent dans les dépressions périphériques et sur les plateaux. Il existe quelques forêts-galeries dans lesquelles sont présentes des espèces de grande taille tels que *Khaya senegalensis*, *Mitragyna inermis*, *Acacia polyacantha*, *Ficus sycomorus* et des espèces lianescentes tel que *Acacia pennata*. La plupart des formations arborées constituent des jachères plus ou moins anciennes.

1.4. Les modes d'utilisation des terres

Il existe deux formes principales de systèmes d'exploitation des terres dans la région Ouest du Burkina : l'agriculture et le pâturage extensifs qui entraînent des modifications des écosystèmes. Chez les *Bwas*, ethnie majoritaire du terroir de Dossi, trois types de champs s'inscrivent successivement dans le paysage, entre le village et la brousse.

Il s'agit (a) des champs ou jardins de case, ressemblant à de très petites parcelles contiguës aux habitations des quartiers. Ces parcelles, protégées d'une palissade de bois ou de tiges de sorgho, sont fumées et cultivées en permanence par les personnes, souvent les plus âgées, qui se déplacent difficilement. On y retrouve du maïs hâtif, du sorgho puis, en fin de saison des pluies, du tabac et des légumes. Les surfaces moyennes des parcelles varient de 1000 m² à quelques ares.

Les champs de villages (b) sont en majeure partie sous un parc à *Faidherbia albida* en apparence homogène. Ils forment une vaste auréole d'un kilomètre de rayon autour de Dossi et incorporent aujourd'hui dans leurs marges un parc à karité (*Vitellaria paradoxa*) et néré (*Parkia biglobosa*). Les cultures y sont majoritairement céréalières : maïs et sorgho. On y cultive aussi du coton, de l'arachide et parfois des tubercules. Les champs, permanents pour la plupart, sont fumés avec du fumier et des ordures ménagères et leur superficie varie du quart d'hectare à moins de 2000 m².

Les champs de brousse (c) sont éloignés de quelques kilomètres à 15 kilomètres du village. Ils sont essentiellement cultivés en coton, maïs et sorgho et assurent la majeure partie de l'économie agricole de Dossi. Les champs sont relativement grands avec des superficies variant de quelques hectares à plus de 15. Ils sont développés en parcs à karités associant dans une moindre proportion, le néré (*Parkia biglobosa*), et ne portent pas de *Faidherbia*. Leur exploitation est itinérante et demeure limitée dans le temps, de 2-3 ans à 10 ans. L'usage des engrais chimiques y est courant autant pour le maïs que pour le coton.

La pratique de la jachère qui constitue un moyen traditionnel de gestion de la fertilité des sols, concerne plus de 20 % des surfaces agricoles du terroir. Elle est généralement de courte durée (moins de 15 ans) du fait de la pression démographique suite à l'arrivée récente de nombreux migrants Moosé et du développement de la culture du coton. Au total, on peut considérer que tous les systèmes de culture sont aménagés en parcs agroforestiers. En 1993, les parcs à *Faidherbia* représentaient 25 % des terres cultivées et les parcs à karité couvraient le reste, soit respectivement 400 et 1100 hectares (DEPOMMIER, 1996). La distribution spatiale des successions culturales fait ressortir une permanence de la culture céréalière basée sur la rotation sorgho-maïs. Ces successions incorporent une à deux années de coton et des jachères de 2 à 3 ans.

Le mode d'élevage est largement extensif. Il est pratiqué par les pasteurs *Fulbés* sédentarisés et les agriculteurs *bwás*. L'élevage constitue une activité économique modeste et concerne surtout les bovins, les petits ruminants (caprins et ovins) et la volaille. Les animaux passent la majeure partie du temps à parcourir les parcs et les brousses pour son alimentation.

Les bovins qui ne forment jamais de grands troupeaux chez les agriculteurs sont plus ou moins intégrés à l'agriculture pour le travail du sol, le transport des produits agricoles et la fourniture du fumier. L'élevage des porcs est très courant et demeure traditionnellement une activité féminine.

Les usages dominants des formations naturelles et des parcs agroforestiers par la population sont essentiellement alimentaires s'agissant des fruits de karité, néré et raisinier (*Lannea microcarpa*) et des feuilles du baobab (*Adansonia digitata*).

Selon DEPOMMIER (1996), l'abondance des ressources ligneuses des brousses et jachères satisfait totalement les besoins en bois de feu ou de construction des habitants.

2. *Faidherbia albida* (Del.) A. Chev.

2.1. Description botanique

Faidherbia albida (Del.) A. Chev. (syn. *Acacia albida*, Del.) est un arbre de la famille des Leguminoaceae, sous-famille des Mimosoideae. Il est très proche de la tribu des Acacieae, avec néanmoins quelques particularités qui lui confèrent le genre monospécifique *Faidherbia* (CHEVALIER, 1934; BONKOUNGOU, 1987a; DEPOMMIER, 1996).

En Afrique sahélo-soudanienne, trois variétés ont été identifiées par NONGONIERMA (1979) chez *Faidherbia albida* (Del.) A. Chev.: *glabra*, *pseudoglabra* et *senegalensis*. Certains caractères différentiels présentés par ces variétés seraient des transitions sensibles d'une variété à une autre. L'arbre est épineux, atteignant une hauteur de 15 à 20 m avec un diamètre à hauteur d'homme de l'ordre du mètre.

La hauteur du fût est en général comprise entre 3 et 4,5 m. Les vieux sujets forment une large cime hémisphérique tandis que celle des jeunes est en pyramide inversée. Le rayon de la couronne est toujours plus grand au Nord ou au Sud, selon l'hémisphère dans lequel se trouve l'arbre car lié aux positions du soleil et par conséquent à l'exercice de la photosynthèse (ABDOU, 1996). L'écorce de l'arbre est d'une couleur brun terne caractéristique allant vers le gris blanc. Lisse dans le jeune âge, l'écorce devient profondément fissurée, crevassée et fibreuse à l'âge adulte.

L'espèce se distingue par ses rameaux épineux (figure 4) de couleur cendrée à blanchâtre formés de courts segments en ligne brisée ainsi que par sa « phénologie inversée ».

Sa phase de végétation se déroule en saison sèche. L'espèce fleurit et fructifie au cours de cette période et la chute des feuilles intervient généralement à l'arrivée des premières pluies. Cette inversion de cycle biologique a fait de *F. albida* un arbre mythique et indicateur dans certaines sociétés traditionnelles Ouest-africaines (ABDOU, 1996). En effet, sa défoliation marque, dans certaines contrées, le début de la saison pluvieuse et par conséquent le début des préparations des champs par les paysans. Plusieurs hypothèses ont été émises pour expliquer le comportement aberrant de *F. albida*. Selon NONGONIERMA (1979), cette défeuillaison pendant la saison des pluies, n'est due qu'à des stimuli rythmiques qui sont des particularités génétiques de l'espèce.

F. albida comporte des feuilles alternes, composées et bipennées, avec des foliolules le long de la pinnule. Les foliolules sont glabres à pubescentes, de couleur vert bleu, oblongues et occasionnellement mucronées, se recouvrant légèrement de 2,5 à 12 mm en

longueur et de 0,7 à 5 mm en largeur. Les épines se présentent en paires et sont insérées à la base des feuilles.

L'inflorescence en épis axillaires denses apparaît deux mois après la feuillaison. Les fleurs sont jaunâtres et portent une cinquantaine d'étamines soudées à la base des pétales.

Le fruit est une gousse indéhiscence, recourbée en demi-cercle, de couleur jaune vif à orange, ayant plus de 1,5 cm de large et contenant 10 à 25 graines noyées dans une pulpe ligneuse.

Les graines sont ovoïdes et marquées par une auréole elliptique. Elles sont protégées par une cuticule cireuse imperméable qui leur permet de se conserver longtemps. *Faidherbia albida* possède un système racinaire mixte, traçant et pivotant à croissance rapide qui lui permet d'atteindre le voisinage de la nappe phréatique d'où il peut extraire l'eau nécessaire pour sa croissance (ALEXANDRE et OUEDRAOGO, 1993).

Faidherbia albida est capable de développer des associations symbiotiques avec les bactéries et les mycorhizes sous forme de nodules pour améliorer le statut de l'azote du sol grâce à la fixation de l'azote atmosphérique. En plus de ces nodules formés sur les racines, le *Faidherbia* forme à la fois des endomycorhizes à vésicules et à arbuscules et des ectomycorhizes (DUCOUSSO et COLONNA, 1993). Ces infections qui stimulent la nodulation, semblent améliorer le développement des jeunes plantes en favorisant l'absorption des phosphates et des oligoéléments.

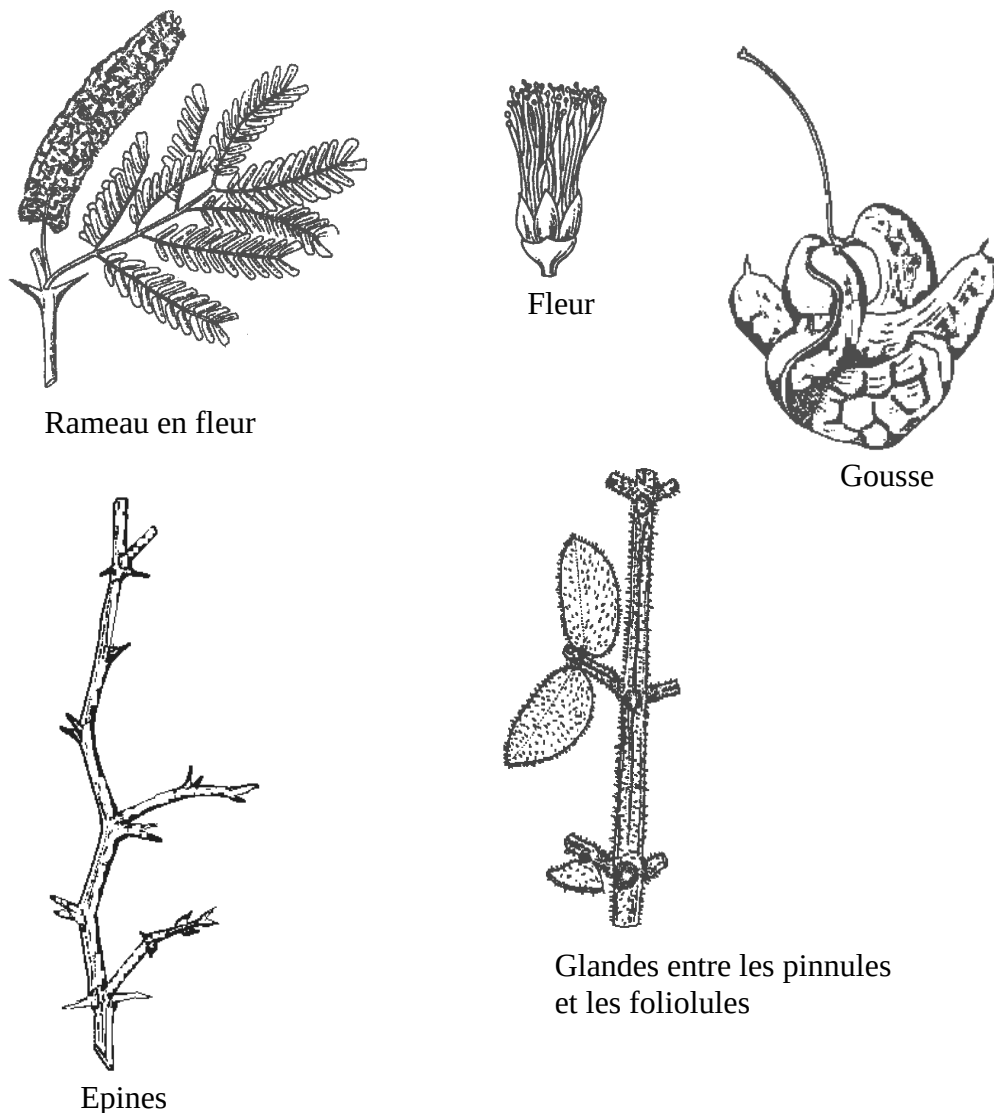


Figure 4. Illustrations botaniques de *Faidherbia albida* (adapté de CTFT, 1989)

2.2. Répartition géographique et écologie

L'aire de répartition de *F. albida* est essentiellement l'Afrique. Depuis la partie nord du continent, elle forme un bandeau qui va des côtes occidentales aux côtes orientales de la zone subsaharienne.

L'espèce effectue aussi des incursions au Sahara à la faveur des cours d'eau permanents ou temporaires. Vers le sud, elle contourne la zone centrale guinéenne, trouve sa limite australe au Lesotho et remonte le long de la côte atlantique Sud en Namibie et en Angola. En dehors du continent Africain, *F. albida* se rencontre dans certains pays de la

méditerranée orientale tels que : Israël, Jordanie, Liban, Palestine, Syrie, Yémen. D'après BONKOUNGOU (1987a), sa limite septentrionale, au Moyen Orient, est 34° N au Liban.

Cette distribution s'accompagne d'une amplitude écologique (ROUPSARD, 1997), en termes de pluviométrie, d'hygrométrie, d'altitude, de sols etc.

Faidherbia albida manifeste une préférence pour les sols alluviaux mais en raison des activités humaines, il est aussi présent sur les sols sableux plus légers et profonds ou sur les sols sablo-argileux (BOFFA, 2000). On le retrouve dans les formations ripicoles et dans les systèmes agro-sylvo-pastoraux appelés « parcs à *Faidherbia* » où il constitue la principale composante arborée (DEPOMMIER, 1996). Au Burkina Faso, *F. albida* figure dans les parcs du pays tout entier à l'exception de l'extrême Sud-Ouest (OUEDRAOGO, 1995).

2.3. Fonctions et usages

Les fonctions et usages de *Faidherbia Albida* sont très variables d'une région à l'autre. En Afrique orientale et australe, l'espèce n'est pas intégrée dans les systèmes agraires mais ses graines seraient consommées par certaines tribus en temps de famine. En Afrique de l'ouest par contre, les populations lui accordent une importance particulière à cause de l'ombre et du fourrage de qualité qu'il fournit. De par son comportement phénologique inversé, l'arbre produit durant la saison sèche des feuilles et des fruits qui sont utilisés comme sources de protéines dans l'alimentation des ruminants. En contre partie, les animaux assurent sa prolifération du fait que les graines ne germent qu'après un transit dans le tube digestif.

Par ailleurs, la gomme, l'écorce, les racines et le bois sont utilisés à de multiples fins, comme la médecine traditionnelle, la fabrication d'objets artisanaux et la production du charbon. Le parc à *Faidherbia* autorise également un système de culture continue sans jachère. C'est dans ce parc et sous les arbres que les cultures, notamment les céréales, donnent les récoltes de meilleure qualité et les rendements les plus élevés. Ainsi, BONKOUNGOU (1993) rapporte que des pratiques traditionnelles perfectionnées intégrant *F. albida* au système de production agricole ont été élaborés par les peuples Haoussa du Niger, les Serers du Sénégal, les Bwaba du Burkina Faso, les Dogons du Mali et diverses civilisations agraires du Delta du fleuve Niger.

3. *Vitellaria paradoxa* Gaertn.

3.1. Description botanique

Le karité du binôme latin *Vitellaria paradoxa* Gaertn. appartient à la famille des Sapotaceae, à la tribu des Mimusopeae et au genre *Vitellaria* (HALL *et al.*, 1996).

C'est un arbre caractéristique des savanes boisées soudaniennes continentales. Il forme des peuplements naturels dans les anciennes jachères. Le karité a un port trapu, un fût court et une cime puissamment branchue et ramifiée. C'est un arbre à latex blanc laiteux, de 15 à 20 mètres de haut. Le port général de l'arbre est d'aspect très varié. Selon RUYSSSEN (1957) trois types de port peuvent être différenciés :

- le port en boule : l'arbre a un houppier de forme compacte, aussi large que haute; son aspect résulte de l'étalement des branches secondaires;
- le port en parasol : l'arbre est caractérisé par une ou deux branches charpentières horizontales et son houppier a une allure générale de champignon;
- le port en balai : l'arbre est de forme allongée, portant toutes les feuilles vers le sommet et dégarnie à la base; les branches sont généralement dichotomiques et l'aspect (de l'arbre) est celui d'un triangle avec le houppier retourné vers le bas.

Les deux ports, parasol et balai, ont été regroupés pour ne former qu'un seul type : le port dressé avec une cime en parasol.

Le tronc et les branches sont recouverts d'une écorce de couleur variant entre le gris et le noir. L'écorce est lisse chez les jeunes pieds et très épaisse et profondément crevassée dans le sens vertical et horizontal chez les arbres adultes (RUYSSSEN, 1957).

L'appareil racinaire du karité est constitué d'un pivot très court qui pénètre dans le sol jusqu'à une profondeur de 0,7 à 1 m (BONKOUNGOU, 1987b).

Les racines latérales traçantes sont très développées et suivent parfois la surface du sol jusqu'à 20 m de longueur (DELOLME, 1947).

Les feuilles du karité sont caduques, simples, entières, alternes, allongées et groupées en rosettes à l'extrémité des rameaux. Les feuilles tombent pendant la saison sèche.

La floraison du karité a lieu de décembre à mars de façon progressive sur le même pied. Les fleurs sont de couleur blanc-crème, très odorantes, mellifères, réunies en pseudo-ombelles (BONKOUNGOU, 1987b) à l'extrémité des rameaux nus (figure 5).

La fructification débute dans le mois d'avril et les fruits mûrissent progressivement de mai à août. Le fruit, subglobuleux ou ovoïde, est une baie renfermant en général une seule graine à tégument brun rouge, marqué d'une grande cicatrice beige, mate et elliptique. A

maturité, le fruit est de couleur vert jaunâtre et généralement sucré. La récolte intervient pendant l'hivernage. La graine de karité renferme 45 à 55% de matière grasse et 9% de protéines (BAUMER, 1995).

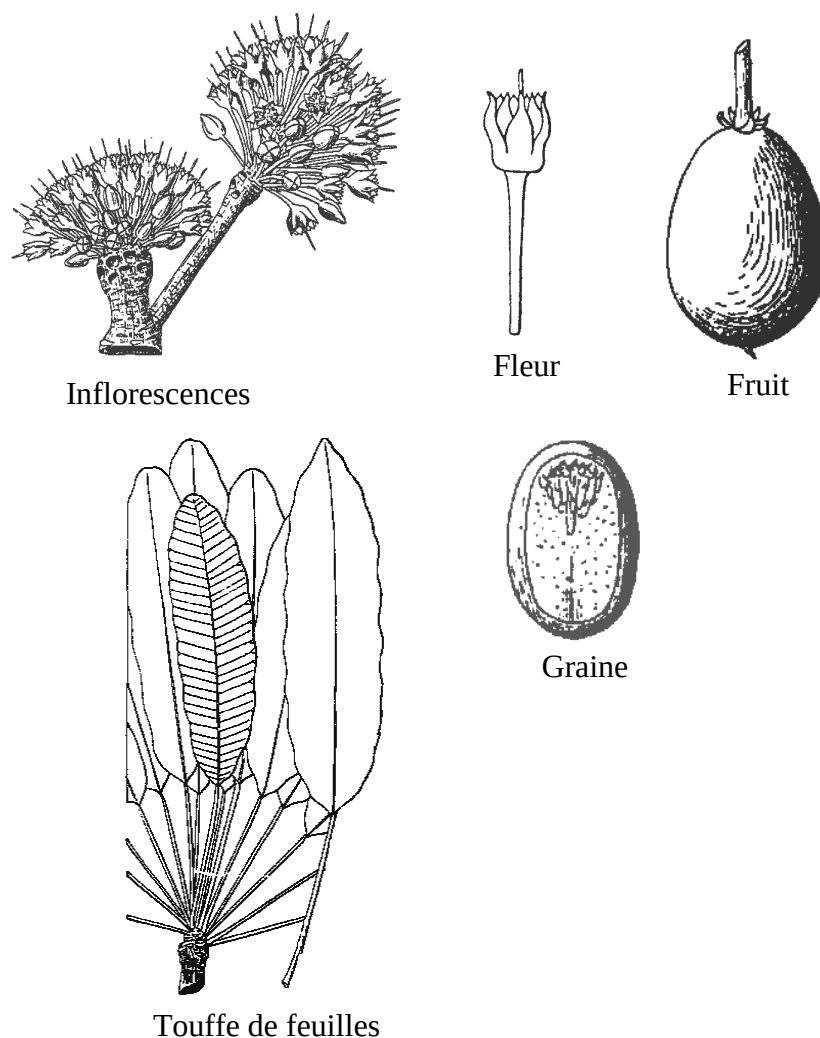


Figure 5. Illustrations botaniques de *Vitellaria paradoxa* (adapté de DELOLME, 1947)

3.2. Répartition géographique et écologie

Selon RUYSSSEN (1957), l'aire naturelle du karité s'étend en Afrique au Sud du Sahara, du Sénégal oriental jusqu'au Nord-Ouest de l'Ouganda, soit du 16^{ème} degré de longitude Ouest au 34^{ème} degré de longitude Est. HALL *et al.* (1996) soulignent que *Vitellaria paradoxa* est présente dans 18 pays repartis dans toute l'Afrique occidentale et une partie de l'Afrique orientale. Elle est présente sur une zone formant une bande de 5000 km sur 400 à 750 km située entre les 15^{ème} et 5^{ème} parallèles.

Selon RUYSSSEN (1957) et GUINKO (1984), *Vitellaria paradoxa* est intimement liée à la présence de l'homme qui protège les jeunes pousses et favorise sa dissémination.

Au Burkina Faso, *Vitellaria paradoxa* est présente dans toutes les zones, excepté le Nord sahélien. Les peuplements les plus importants sont situés au Nord de Bobo-Dioulasso (BOUSSIM, 1991).

3.3. Fonctions et usages

Le fruit du karité est le principal produit non ligneux utilisé par les populations locales. La partie charnue qui entoure la graine est savoureuse et les fruits sont récoltés pour être consommés frais sur place ou vendus sur les marchés des villages et des villes. La graine renferme de la matière grasse que l'on extrait après l'avoir décortiquée. Cette graisse qui est beaucoup appréciée dans la cuisine traditionnelle, sert de combustible et à la fabrication des produits cosmétiques. Elle a également de nombreuses applications en médecine traditionnelle pour soigner les contusions et les affections cutanées. Les décoctions des racines et des écorces sont bues ou utilisées pour des bains aux vertus curatives. Les fleurs du karité sont très fréquentées par les abeilles pour son nectar et son bois rouge difficile à travailler et très résistant aux termites sert à fabriquer des produits artisanaux et du charbon. Outre ces usages locaux, les graines de karité représentent pour les économies sahéliennes une importante source de recettes d'exportation.

4. *Zea mays* L.

4.1. Caractéristiques botaniques et agronomiques

Le maïs du binôme latin *Zea mays* L. est une plante herbacée annuelle qui appartient à la famille des Poaceae et à la tribu des Maydeae ou des Tripsaceae.

Le maïs a une tige pleine, haute de 0,4 à 5-7 m et grosse de 1 à 7 cm, de couleur verte ou rouge suivant les variétés. Les feuilles sont alternées, rubanées, d'une largeur de 5 à 10 cm et d'une longueur de 50 à 80 cm avec des nervures parallèles. Le maïs a un système racinaire fasciculé comprenant des racines séminales présentes dans l'embryon et des racines adventives formées après la levée, au stade de 3 à 6 feuilles. Les racines coronaires ou d'ancrage apparaissent ultérieurement (au stade 7 feuilles) sur les nœuds en situation aérienne. Ce sont des racines adventives non fonctionnelles.

Le maïs présente un métabolisme photosynthétique de type C₄. C'est une plante allogame monoïque, bisexuée dont la fécondation croisée est favorisée par sa protandrie. Les

inflorescences mâles et femelles sont portées sur le même pied à des hauteurs distinctes. Les fleurs mâles sont regroupées en panicule terminale et les fleurs femelles en épi situé à l'aisselle des feuilles médianes (Figure 6). Chaque épi est constitué d'un axe épais et spongieux : rachis ou rafle, sur lequel se trouvent insérés verticalement les grains ou caryopses. L'épi est enveloppé par de larges feuilles ou les spathes qui jouent un rôle protecteur.

Le maïs se multiplie par semis direct des graines. La durée du cycle végétatif varie sous les tropiques de 70 à 130 jours et parfois plus dans les zones d'altitude. Le maïs est semé au moment où les pluies sont bien installées et à des écartements de 0,4 m x 0,8 m correspondant à une densité moyenne de 60.000 plants/ha.

Les besoins du maïs en éléments fertilisants varient selon le climat. En zone de savane guinéenne, ces besoins sont de l'ordre de 100-175 kg/ha d'unités d'azote (N) et de 25-65 kg/ha d'unités de phosphore (P).

Ils sont par contre de l'ordre de 60-120 kg/ha de N et de 17-44 kg/ha de P dans la zone de savane soudanienne (KOWAL et KASSAM, 1978; SANOU, 1993).

4.2. Ecologie

Le maïs est une plante qui pousse bien dans les zones où la température est assez élevée et régulière. Les températures proches de 10 °C et un peu plus de 30 °C sont favorables pour la germination et la croissance de la jeune plantule. En revanche, certaines variétés ont leur fécondation perturbée si le sol, mal humidifié, atteint des températures dépassant 35 °C et si l'air est trop sec. La température influence également la durée du cycle végétatif du maïs. Selon AZHARI (1988), une même variété de maïs semée à 1500 m d'altitude aura, sous les tropiques, un cycle beaucoup plus long qu'au bord de la mer.

Le maïs est une plante exigeante en eau. Les besoins sont étroitement liés au climat et varient avec la durée du cycle de la culture. En zone de savane guinéenne, 500 mm d'eau de pluie bien répartis suffisent pour couvrir les besoins en eau d'un maïs à cycle de 90 jours alors qu'il faudrait un peu plus de 900 mm d'eau de pluie en zone soudanienne pour couvrir les besoins en eau d'un maïs à cycle de 120 jours (AZHARI, 1988).

En général le maïs nécessite pour toute sa période de croissance des précipitations comprises entre 500 et 700 mm (EDMEADES *et al.*, 1995).

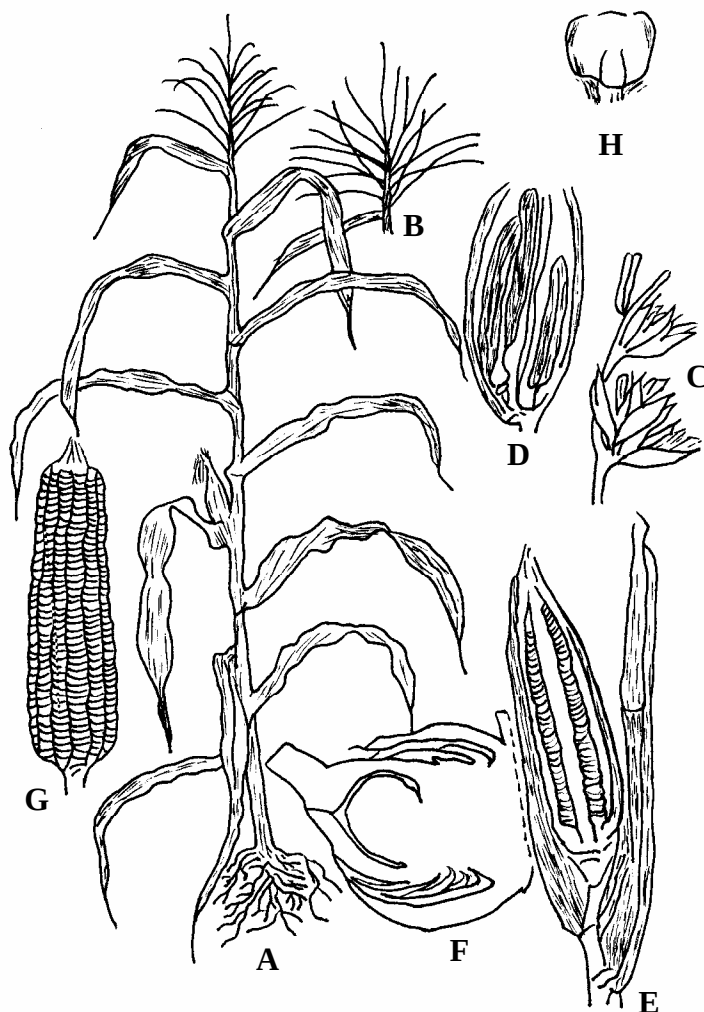


Figure 6. Les différentes parties du maïs. A, plante ; B, inflorescence mâle (panicule) ; C, épillets mâles ; D, épillet mâle (coupe longitudinale) ; E, inflorescence femelle (coupe longitudinale) ; F, épillet femelle (coupe longitudinale) ; G, épi ; H, caryopse (grain) (Adapté de PURSEGLOVE, 1972)

4.3. Les effets du déficit hydrique sur le maïs

Le maïs jeune est extrêmement sensible à une contrainte hydrique principalement au stade 1-2 feuilles et sans doute avant, au moment de sa germination. Une brève période de sécheresse survenant à ce moment entraîne un retard dans l'élongation foliaire avec une réduction de la taille finale et une limitation de la longueur des racines. Le déficit hydrique peut restreindre la surface foliaire et accélérer la sénescence (BARLOY, 1984).

Au-delà de ce stade, la croissance racinaire est beaucoup moins affectée que celle des feuilles. Mais si la sécheresse est sévère au moment de la phase végétative, elle peut provoquer la mort des jeunes plants et réduire ainsi la densité du peuplement.

La sécheresse la plus précoce intervenant deux (02) semaines avant la floraison peut réduire le rendement de 25 % (FRE, 1982 cité par HEMA, 1994). Si elle intervient pendant la floraison, le rendement est réduit de 50 à 60 % (ROBELIN, 1984). DENMEAD et SHAW (1960) ont relevé des taux de 25 %, 50 % et 21 % correspondant à des réductions de rendement causées par le stress hydrique intervenant respectivement avant, pendant et après la floraison.

La période de sécheresse la plus cruciale chez le maïs, comme le soulignent CLAASSEN et SHAW (1970), se situe de 5 jours avant à 5 jours après la floraison femelle et peut occasionner des pertes de rendement de 2 à 13 % par jour de stress hydrique.

Pour EDMEADES *et al.* (1995), cette sensibilité du maïs à la sécheresse en période de floraison est en partie due au fait que la fleur mâle et la fleur femelle sont éloignées de 30 à 100 cm et que les soies doivent atteindre une longueur pouvant aller jusqu'à 30 cm pour sortir des spathes et être pollinisées dans un environnement dessicant. Une des réactions du maïs en cas de sécheresse consiste en l'augmentation de l'intervalle entre l'anthèse (déversement du pollen) et la floraison (apparition des soies sur l'épi). Une autre consiste également à faire apparaître tardivement les soies. Dans tous les cas, la pollinisation et la fécondation peuvent avoir lieu, mais le développement du grain s'arrêtera peu de temps après (GRANT *et al.*, 1989) donnant lieu à une distribution inégale des grains, à des épis nus à l'extrémité, voire à une stérilité complète.

Le maïs peut être cultivé sur une large gamme de types de sol dont le pH est compris entre 5 et 8. Il se développe et produit mieux sur des sols riches en matière organique, bien structurés et pouvant jouer le rôle de réservoir régulateur des pluies.

Conclusion partielle

Il ressort de cette présentation sur le milieu naturel que les conditions de pluviosité et les sols rencontrés dans le terroir de Dossi situé à l'Ouest du Burkina Faso, sont favorables à une exploitation agricole intense et durable. Mais, l'évolution actuelle des systèmes de production basés sur le coton entraîne une extension progressive des surfaces cultivées au détriment des zones de parcours et de forêts. La déforestation et la disparition de la jachère provoquent un déséquilibre du milieu que la sécheresse vient souvent exacerber. Malgré l'appauvrissement du couvert végétal, les paysages agraires de ce terroir se caractérisent par l'omniprésence de l'arbre associé aux cultures en parcs agroforestiers. Les avantages des ligneux dans l'amélioration de la fertilité des sols et de la productivité des cultures seront traités dans les prochains chapitres.

CHAPITRE II

Impact de la litière foliaire des deux espèces agroforestières sur la
matière organique du sol dans les agrosystèmes

Introduction

Dans la région ouest du Burkina réputée pour la culture du coton et à l'instar d'autres régions soudaniennes, des résultats d'expérimentations de longue durée ont montré que la diminution de la productivité des cultures est probablement due à la baisse de la teneur en matière organique, à l'acidification et à l'épuisement des nutriments des sols cultivés (PIERI, 1989; SEDOGO, 1993; BATIONO et BUERKERT, 2001). Pour améliorer la productivité de ces zones agricoles à risque et assurer le maintien de la fertilité des sols, les ligneux constituent une composante cruciale, essentiellement du fait de leurs fonctions de protection du sol (BREMAN et KESSLER, 1995).

Les effets bénéfiques de la présence des arbres dans les champs cultivés ont été mentionnés par plusieurs auteurs. En effet, selon SANCHEZ (1995) la biomasse produite par les arbres peut atteindre 6 tonnes/ha/an et un recyclage approprié d'une partie de cette biomasse est une source importante de matières organiques pour le sol et d'éléments nutritifs pour les cultures associées. La production des litières et le recyclage des éléments minéraux sont généralement plus importants sous les arbres que dans les champs ouverts (BREMAN et KESSLER, 1995; NYBERG et HÖGBERG, 1995; BOFFA, 2000). Ces litières, tout en favorisant l'activité biologique dans le sol (YOUNG, 1995) contribuent à améliorer les propriétés physiques et chimiques des sols cultivés (LAL, 1989a; KATER *et al.*, 1992; TRAORE *et al.*, 2004).

L'objectif de cette étude est de déterminer d'une part, la quantité de litière produite par le *Faidherbia* et le karité selon les caractéristiques morphologiques propres à chaque espèce et d'autre part, les constituants chimiques de cette litière et son impact sur la matière organique du sol. Nous formulons l'hypothèse que ces arbres conservés par les paysans sur les terres agricoles contribuent à améliorer la qualité des sols à travers la production et le recyclage de la litière foliaire.

1. Matériel et méthodes

1.1. Mesures morphologiques des arbres

Les mesures morphologiques prises sur les pieds de karité et de *Faidherbia* de la zone étudiée comprennent :

- la circonférence à 1,30 m de hauteur ou à hauteur d'homme est calculée à partir des mesures du diamètre des troncs effectuées à l'aide du relascop de Bitterlich (GOUNOT, 1969); elle renseigne sur la dynamique des peuplements face aux conditions de croissance et aux opérations sylvicoles pratiquées (RONDEUX, 1993) ;
- la hauteur totale mesurée du sol, au pied des arbres, jusqu'à leur sommet, aux bourgeons terminaux, avec un dendromètre Blume-Leiss; la mesure de la hauteur permet de caractériser les étapes de croissance des arbres et de différencier les strates ;
- le diamètre du houppier mesuré à partir de sa projection au sol avec un mètre ruban dans les directions nord-sud (DNS) et est-ouest (DEO) ;
- la surface du houppier assimilée à une ellipse (S) a été calculée à partir de la mesure des diamètres (DNS et DEO) selon la formule ci-après : $S = \Pi \frac{DNS \times DEO}{4}$;

Le calcul de la surface du houppier permet d'obtenir le taux de recouvrement ou de couverture du sol qui renseigne sur la répartition horizontale de la végétation, la densité et la grosseur des arbres et leur aménagement.

1.2. Collecteurs de la litière

La quantification de la litière a été réalisée à l'aide des collecteurs confectionnés à partir d'un tissu en nylon de 1 mm de maille raccommode sous forme de sac sur un cadre métallique d'une superficie de 0,25 m² (0,5 m x 0,5 m) (figure 8). Les collecteurs ont été installés de part et d'autre des arbres à 0,6 m du sol dans les quatre directions Est, Ouest, Nord et Sud et à des distances qui étaient fonction du rayon (R) de la projection du houppier au sol (figure 7). La collecte des feuilles sénescents a été réalisée sous huit arbres suffisamment distants dont 4 pieds dans le parc à karité et 4 dans le parc à *Faidherbia*. Les caractéristiques morphologiques des huit sujets retenus pour cette étude sont regroupées dans le tableau I.

Vingt quatre collecteurs ont été placés sous chaque arbre dont 4 collecteurs au pied de l'arbre, 4 à la distance égale à deux fois le rayon (2R), 8 à la distance égale à mi-rayon (R/2) et 8 à la distance égale au rayon (R) (figure 7).

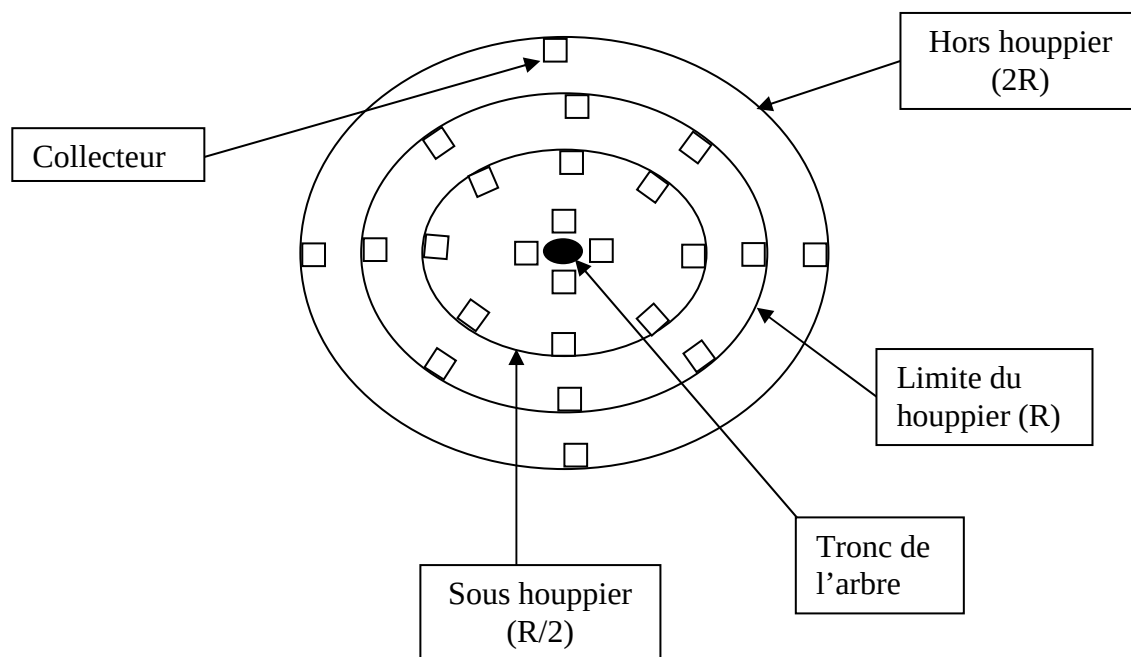


Figure 7. Disposition des collecteurs de la litière foliaire sous les arbres à Dossi, Burkina Faso. R = rayon du houppier

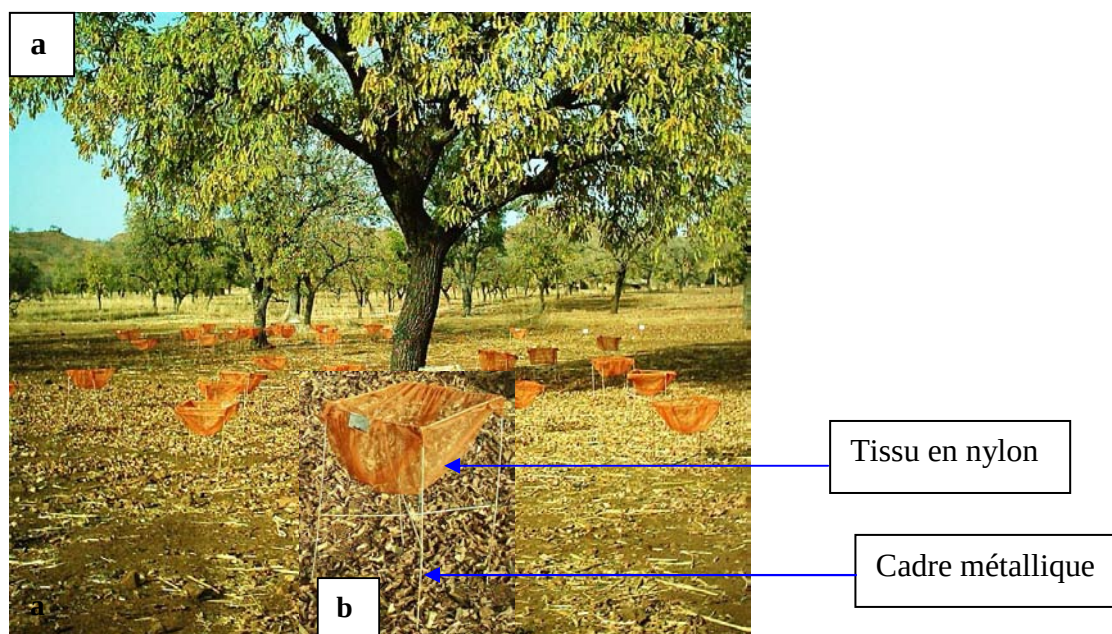


Figure 8. Vue d'un dispositif de collecteurs de la litière foliaire sous un karité (a) à Dossi, (Burkina Faso) et détails du collecteur (b).

Tableau I. Caractéristiques morphologiques des arbres sélectionnés pour la collecte de la litière foliaire.

Arbres	Rayon moyen du houppier (m)	Circonférence du tronc à 1,30m (m)	Surface totale du houppier (m ²)
Parc à <i>F. albida</i>			
A	8,32	1,74	217,36
B	7,65	2,25	183,76
C	8,73	2,85	239,30
D	6,58	2,15	135,57
Parc à <i>V. paradoxa</i>			
E	4,20	1,73	55,39
F	5,65	1,56	100,24
G	4,67	1,17	67,89
H	5,35	1,75	89,87

1.3. Quantification de la litière

La litière a été quantifiée suivant les cycles phénologiques de *Faidherbia* et du karité. Cette quantification a été réalisée pendant la saison sèche froide et chaude (de décembre 2005 à mars 2006) période au cours de laquelle le karité perd ses feuilles et le début de l'arrivée du Front intertropical (de mars à juin 2006), période correspondant à la chute des feuilles de *Faidherbia*. La litière a été collectée tous les trois (3) jours pour le karité et tous les deux (2) jours pour le *Faidherbia*. La litière collectée a été séchée à l'étuve à 60°C pendant 48 h et ensuite pesée. Par extrapolation à la surface totale couverte par le houppier, la quantité de litière produite par chaque arbre a été estimée selon la formule ci-après :

$$Q = \frac{S_t \times Q_c}{S_c} \quad (1)$$

avec Q , la quantité totale de litière produite, Q_c la quantité de litière recueillie dans les collecteurs, S_t la surface totale du houppier de l'arbre et S_c la surface totale couverte par les collecteurs.

1.4. Analyses chimiques du sol

Des échantillons de sol ont été prélevés à 10 cm de profondeur dans quatre points différents de chaque zone située sous et hors houppier des huit arbres sélectionnés dans les deux parcs. Les échantillons de chaque zone ont été mélangés pour former un échantillon composite.

Le sol a été séché au soleil et tamisé à 0,5 mm avant d'être minéralisé par la méthode KJELDAHL. L'azote total et le phosphore total ont été déterminés par colorimétrie. Le phosphore disponible (P-Bray) a été déterminé par la méthode Bray I (BUNASOLS, 1987). Le carbone total du sol a été déterminé par la méthode de WALKLEY et BLACK (1934) : oxydation du sol dans une solution aqueuse de bichromate de potassium et d'acide sulfurique et par titrage avec une solution de sulfate ferreux. Le pH (H₂O) du sol a été mesuré à l'aide d'un pH-mètre électronique en diluant 20 g de sol dans 50 ml d'eau distillée.

1.5. Analyses chimiques des feuilles sénescentes

Des échantillons de feuilles sénescentes des deux espèces ont été prélevés et analysés au laboratoire en vue de déterminer les éléments chimiques suivants : le carbone total, l'azote total, le phosphore total et le potassium total. Après une minéralisation des échantillons par la méthode KJELDAHL, l'azote total et le phosphore total ont été déterminés à l'aide d'un colorimètre automatique (Skalar SAN^{plus} Segmented flow analyzer, Model 4000-02, Breda, the Netherlands). Le potassium total a été déterminé à l'aide d'un photomètre de flamme (Jencons PFP 7, Jenway LTD, Felsted, England). Le carbone total est déterminé par incinération de 1g d'échantillon au four à moufle à 550 °C pendant 5 heures.

2. Résultats et Discussion

2.1. Caractéristiques morphologiques des arbres

L'aire de cette étude regroupe deux parcs monospécifiques à karité et à *Faidherbia* dont les superficies sont respectivement de 1,75 et 2 ha. La densité ligneuse moyenne du parc à karité est de 24 arbres/ha et celle du parc à *Faidherbia* est de 30 arbres/ha. En termes d'agriculture ces peuplements peuvent présenter une forte densité. Une analyse de la hauteur moyenne des arbres en relation avec la classification des formations végétales de Yangambi en 1956 fait ressortir un seul type de strate au niveau des deux parcs. Il s'agit de la strate arborée dont la hauteur des arbres est d'au moins 7 m. Cette strate qui constitue la structure du

parc à karité comporte cependant une fraction arbustive au niveau du parc à *Faidherbia* dont la hauteur des arbres est au plus supérieure à 6 m (annexe 2).

La fraction arbustive qui ne représente que 3 % de l'effectif du parc correspond à un peuplement de régénérations (Figure 9).

En se basant sur le regroupement des classes de circonférences (DEPOMMIER, 1996) en un groupe de jeunes individus (circonférence <100 cm) comparé aux groupes des individus les plus âgés (circonférence >100 cm), on relève que la fréquence cumulée des individus âgés est relativement plus élevée dans le parc à *Faidherbia* (33 %) que dans le parc à karité (26 %) (Figure 10). De par cette fréquence, le parc à *Faidherbia* apparaît comme un parc âgé et vieillissant malgré la présence d'un effectif plus important d'individus jeunes (28 %) qui dans la réalité sont sans doute moins jeunes, compte tenu des contraintes de croissance du site (DEPOMMIER, 1996). Le caractère juvénile de quelques individus du parc résulte d'une régénération à partir des fragments de racines sectionnées au moment des labours.

De telles boutures s'enracinent facilement et au bout de 3-4 ans elles deviennent des plants plus vigoureux que ceux issus des graines et sont munis de plusieurs pivots avec de nombreuses ramifications (OUEDRAOGO, 1993). Ce mode de régénération de *Faidherbia* est souvent mal conservé car autant le labour des champs favorise la multiplication des drageons autant il constitue un facteur d'élimination. La comparaison des distributions de la surface du houppier des arbres des deux parcs montre que les individus les plus âgés (circonférence > 100 cm) sont de très grandes dimensions (Figure 11).

Au dessus de 100 m² de surface de houppier, les *Faidherbia* sont mieux représentés dans les classes supérieures que les karités ; la surface du houppier de ces derniers étant beaucoup plus centrée sur la classe 25-100 m². Cette classe dont la fréquence cumulée est relativement plus élevée (37 %) dans le parc à karité, comprend non seulement des individus jeunes mais aussi un nombre important d'individus adultes dont les houppiers sont fréquemment élagués pour limiter les effets de compétition sur les cultures associées.

Dans le parc à *Faidherbia*, l'émondage touche très peu les arbres adultes qui sont dans l'ensemble assez hauts. Cette situation qui semble ne pas porter préjudice au développement et au rendement des cultures, serait en partie due au rôle améliorateur de l'arbre comme l'ont souligné plusieurs auteurs (VANDENBELDT et WILLIAMS, 1992; DEPOMMIER, 1996; RHOADES, 1997; KHO *et al.*, 2001).

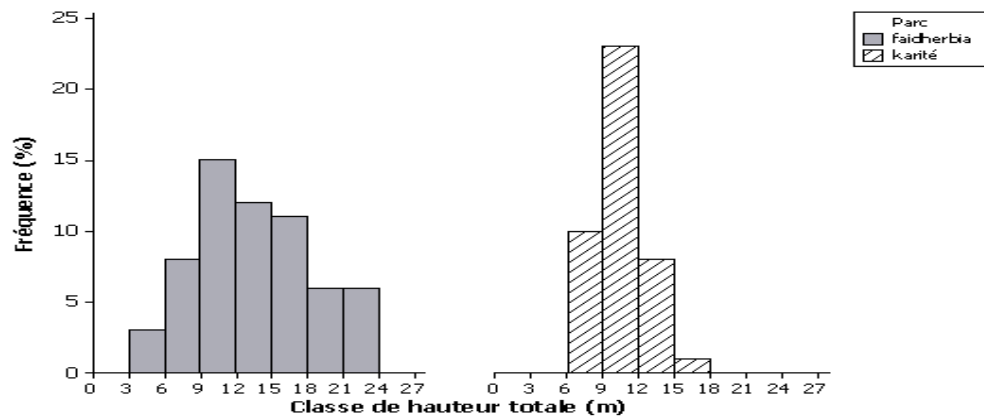


Figure 9. Distribution et fréquence des classes de hauteur de *Faidherbia* et du karité dans les parcs agro-forestiers de Dossi, Burkina Faso.

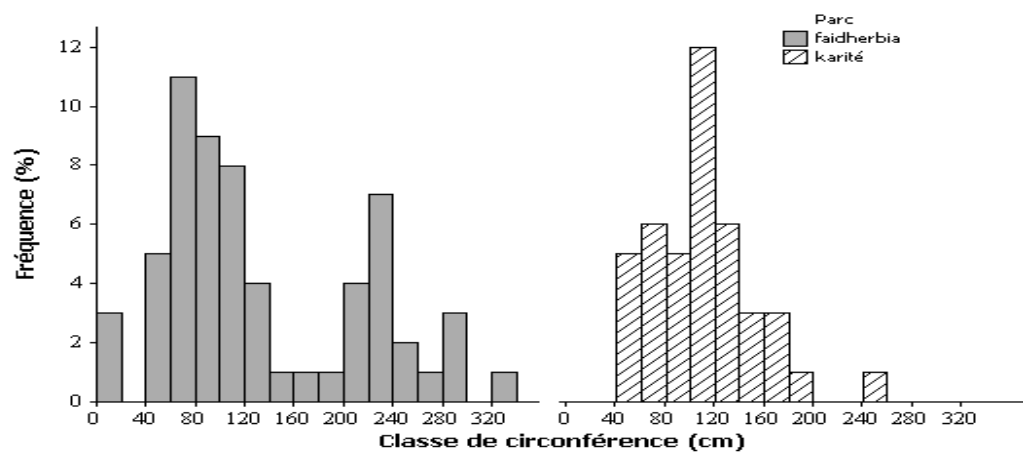


Figure 10. Distribution et fréquence des classes de circonférence de *Faidherbia* et du karité dans les parcs agro-forestiers de Dossi, Burkina Faso.

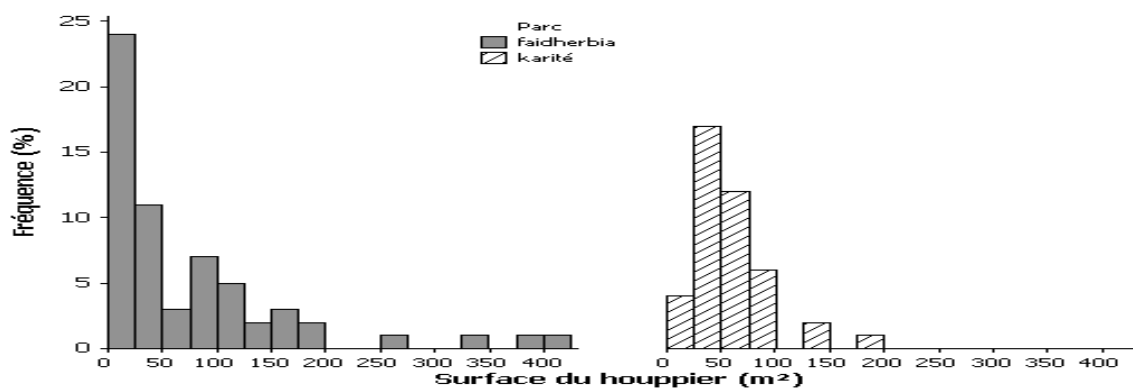


Figure 11. Distribution et fréquence des classes de surface du houppier de *Faidherbia* et du karité dans les parcs agroforestiers de Dossi, Burkina Faso.

2.2. Production de la litière foliaire de *Faidherbia*

La litière foliaire produite annuellement par *F. albida* a été en moyenne de 7,79 kg arbre⁻¹an⁻¹ (tableau II). Les résultats indiquent que la production de la litière foliaire varie en fonction de la surface du houppier (BREMAN et KESSLER, 1995). La biomasse foliaire estimée est de 2,18 kg pour une surface de houppier de 135,57 m² et de 9,90 kg pour une surface du houppier de 239,30 m². Au Burkina Faso, sur une période de deux saisons d'émondage total de *Faidherbia*, DEPOMMIER et GUERIN (1996) étaient arrivés aux résultats selon lesquels la production foliaire variait de 3 à 22 kg arbre⁻¹an⁻¹ pour les petits arbres (25 à 50 m² de surface du houppier) et de 15 à 40 kg pour les plus grands (50 à 300 m² de surface de houppier).

Au Sénégal, JUNG (1969) a estimé la production foliaire moyenne de cinq *Faidherbia* de diamètre compris entre 0,40 et 1,10 m à 58 kg arbre⁻¹an⁻¹. MIEHE (1986) en Ethiopie trouvait des valeurs de l'ordre de 20 à 50 kg arbre⁻¹an⁻¹. Nos résultats corroborent ceux de nos prédécesseurs qui montrent que la production foliaire la plus élevée en valeur absolue est toujours obtenue avec les ligneux de taille élevée et mature. Il faut toutefois souligner que la méthode des collecteurs de litière sous-évalue la production foliaire de *Faidherbia* comparée à la méthode par émondage total. Cette différence de poids entre les deux méthodes peut en partie être attribuée à l'effet des vents qui dévient la trajectoire de chute des feuilles sénescentes en les entraînant loin des collecteurs. Il arrive par moment que ces vents vident les collecteurs de leur contenu. Ce cas de figure s'observe également si d'aventure les collecteurs ne sont pas protégés ou surveillés contre les animaux qui pâturent sous les arbres.

Tableau II. Quantité de litière annuelle produite par les *Faidherbia* à Dossi, Burkina Faso

Arbres	Surface du houppier projeté au sol (m ²)	Quantité de litière produite (kg)
A	217,36	9,65
B	183,76	9,44
C	239,30	9,90
D	135,57	2,18
Moyenne	193,99	7,79
Etm	39,10	3,24

Etm = écart-type de la moyenne

2.3. Production de la litière foliaire du karité

La production de la litière foliaire (tableau III) qui varie en fonction de la taille du houppier est de 8,55 kg pour le plus petit houppier de 55,39 m² et de 42,26 kg pour le plus grand houppier de 100,24 m². La biomasse foliaire annuelle produite par le karité est estimée en moyenne à environ 24,50 kg arbre⁻¹an⁻¹. Ces résultats corroborent ceux de BAMBARA (1993) qui avait obtenu une production de 29 kg arbre⁻¹an⁻¹ grâce à la technique des paniers à litière placés sous des karités de 0,42m de diamètre.

Selon TRAORE *et al.* (2004), cette production de la litière foliaire du karité pourrait augmenter avec l'amélioration des conditions édaphiques (positions topographiques et fertilité des sols) pour atteindre 56,7 kg arbre⁻¹an⁻¹. Par ailleurs, BREMAN et KESSLER (1995) rapportent que les plantes ligneuses de plus grande taille et matures possèdent les rendements foliaires les plus élevés que les ligneux jeunes ou de petite taille. Ces rendements qui sont favorisés par les conditions du milieu en l'occurrence une disponibilité accrue en eau et en nutriments, demeurent parfois limités dans les années de faibles pluviométries. L'ensemble de ces facteurs qui influe sur la production foliaire auquel il faut ajouter la variété de l'espèce et les micro-habitats différents, pourrait expliquer en partie la disparité de la production foliaire constatée entre les individus du parc.

Tableau III. Quantité de litière annuelle produite par les karités à Dossi, Burkina Faso

Arbres	Surface du houppier projeté au sol	Quantité de litière produite
	(m²)	(kg)
E	55,39	8,55
F	100,24	42,26
G	67,89	19,15
H	89,87	28,03
Moyenne	78,35	24,49
Etm	17,66	12,35

Etm = écart-type de la moyenne

2.4. Analyses chimiques des feuilles sénescentes

L'analyse chimique des feuilles sénescentes (tableau IV) indique que les teneurs des éléments nutritifs excepté le carbone (C) sont relativement plus élevées dans la litière de *Faidherbia* que dans celle du karité. La prédominance de l'azote dans la litière de *Faidherbia* est supposée normale car l'espèce est réputée pour être une légumineuse, capable de fixer l'azote atmosphérique dans des nodosités localisées sur son système racinaire. Cet azote fixé pourra par la suite être accumulé dans les feuilles. Les teneurs du phosphore (P) et du potassium (K) de la litière du karité sont également plus élevées que celles rapportées par HALL *et al.* (1996) probablement à cause de la qualité du sol. Quant à la qualité de la litière, elle serait meilleure pour le *Faidherbia* que pour le karité dont le rapport C/N est très élevé (tableau IV).

Toutefois, selon RHOADES (1997), les arbres dont le rapport C/N de la litière foliaire est très élevé, génèrent plus des formes stables de matériel organique du sol capables de résister à des oxydations rapides. Des valeurs en N, P et K des feuilles fraîches issues des émondes du karité rapportées par BAYALA *et al.* (2005), ont été deux fois plus élevées que celles que nous avons obtenues, peut être à cause de la retranslocation de ces éléments nutritifs des feuilles vers les fruits ou les fleurs lors de l'abscission. En effet, VANLAUWE *et al.* (2001), en comparant la teneur des éléments nutritifs des feuilles de différents âges, se sont aperçus que cette teneur diminuait avec l'âge.

Tableau IV. Teneur initiale des éléments nutritifs dans la litière foliaire de *Faidherbia* et du karité à Dossi, Burkina Faso.

	Eléments nutritifs				
	N (g kg ⁻¹)	C (g kg ⁻¹)	P (mg kg ⁻¹)	K (mg kg ⁻¹)	C/N
Litière foliaire de <i>F. albida</i>	18,1 ± 3,6	494 ± 16	1225 ± 207	4715 ± 587	27
Litière foliaire de <i>V. paradoxa</i>	8,4 ± 0,7	534 ± 32	839 ± 198	1616 ± 666	64

2.5. Analyses chimiques du sol

Les résultats de l'analyse chimique du sol (tableau V) montrent que la litière foliaire lors de sa décomposition, libère des éléments nutritifs qui s'accumulent progressivement dans le sol. Les teneurs des éléments nutritifs du sol sont similaires dans les deux parcs excepté le carbone dont la teneur est relativement plus élevée sous les houppiers du karité que ceux de *Faidherbia*. La différence en teneur de carbone est probablement due au processus de décomposition de la litière foliaire (SANCHEZ, 1995) qui serait plus rapide pour le *Faidherbia* à cause de sa teneur initiale plus élevée en azote et de son rapport C/N plus faible (tableau IV).

Selon RICHARDS (1987), la présence de l'azote est indispensable pour la minéralisation primaire de la matière organique, car il affecte l'adaptation physiologique des organismes associés à cette décomposition. La persistance de la litière foliaire du karité aux attaques de la macrofaune du sol explique en partie que le taux du carbone sous le houppier ne diffère pas significativement de celui en dehors du houppier. La litière qui est aussi dispersée par le vent à travers tout le parc, contribue à réduire davantage cette différence.

BAYALA *et al.* (2005) ont rapporté que seulement 57 % du poids de la litière du karité étaient décomposés après la saison des pluies. Ce faible taux de décomposition amène souvent les paysans à brûler les feuilles sénescentes du karité à l'approche de l'hivernage à défaut de technologies appropriées. Par ailleurs, si le brûlis permet de rendre certains minéraux immédiatement disponibles, il peut au contraire, à une certaine intensité, oxyder une bonne partie de la matière organique du sol (LOUPPE *et al.*, 1998).

Dans les deux parcs, le taux du carbone a été en général plus élevé sous le houppier qu'en dehors du houppier. Cette prédominance du carbone sous les houppiers pourrait être attribuée à l'apport régulier de la litière composée des feuilles, des branches et des racines sénescentes mais aussi à des fientes d'oiseaux et à des déjections d'animaux qui pâturent ou se reposent à l'ombre des arbres (BELSKY *et al.*, 1989; DEPOMMIER, 1996; TOMLINSON *et al.*, 1998).

Tableau V. Caractéristiques chimiques de l'horizon 0-10 cm du sol, sous et hors houppier de *Faidherbia* et du karité à Dossi, Burkina Faso.

Constituants chimiques					
Parc à	pH eau	N total (mg g ⁻¹)	C total (mg g ⁻¹)	P total (mg kg ⁻¹)	P disponible (mg kg ⁻¹)
<i>F. albida</i>					
Sous houppier	5,9 ± 0,10	1,04 ± 0,17	16,2 ± 1,90	364 ± 41	3,3 ± 0,50
Hors houppier	5,9 ± 0,10	0,80 ± 0,12	11,6 ± 1,30	319 ± 35	2,7 ± 0,50
Parc à <i>V. paradoxa</i>					
Sous houppier	5,9 ± 0,03	1,08 ± 0,08	19,7 ± 2,00	360 ± 19	2,4 ± 0,40
Hors houppier	6,0 ± 0,10	0,79 ± 0,07	17,4 ± 1,90	341 ± 31	3,2 ± 0,30

Conclusion partielle

On retient de ce chapitre que le peuplement ligneux des deux parcs est de nature monospécifique. La structure verticale de ce peuplement se caractérise par une faible représentation de la strate arbustive et une prédominance de la strate arborée dont la hauteur des arbres est d'au moins 7 m. La strate arbustive qui ne représente que 3 % de l'effectif du parc à *Faidherbia* correspond à un peuplement de juvéniles. L'utilisation des collecteurs a permis une meilleure quantification de la litière foliaire du karité que celle de *Faidherbia*.

De par cette méthode qui préserve mieux les ligneux, la quantité de litière produite par le *Faidherbia* est deux fois moins importante que celle obtenue par émondage total de l'arbre. L'analyse chimique des sols a révélé que la teneur du carbone est relativement plus élevée sous le karité que sous le *Faidherbia*. Cette différence en carbone est favorisée par le faible taux de décomposition de la litière foliaire du karité. La persistance de la litière foliaire du karité malgré les attaques de la macrofaune du sol peut constituer un avantage car elle permet de maintenir les propriétés physiques des sols et de les protéger contre le ruissellement et l'érosion de surface.

CHAPITRE III

Influence des deux espèces agroforestières sur l'infiltrabilité des sols
dans les agrosystèmes

Introduction

L'infiltrabilité est une des composantes clés des caractéristiques physiques des sols qui joue un important rôle dans la recharge des nappes souterraines, l'érosion hydrique des sols et le ruissellement (BONELL, 1993; BONELL et BALEK, 1993; BONELL, 2005). Dans les régions semi-arides, les averses exceptionnelles d'une forte intensité (60 à 120 mm/h) constituent la principale cause du ruissellement qui provoque de l'érosion et la dégradation des états de surface (SIVAKUMAR et GNOUMOU, 1987; SOME, 1989). Une méta-analyse récente a démontré l'intérêt de l'utilisation des arbres dans l'amélioration de l'infiltrabilité du sol mais aussi l'insuffisance en général des études pour analyser davantage l'impact des arbres dans les systèmes agricoles et sylvicoles en tenant compte des situations édaphiques, des espèces et du climat (ILSTEDT *et al.*, 2007).

En Afrique sub-saharienne, les champs agricoles sont constitués des défriches de la savane arborée (BREMAN et KESSLER, 1995) dans lesquels des systèmes de culture permanente se révèlent adaptés au *Faidherbia* alors que des cycles successifs de jachère et de cultures tournent à l'avantage du karité (BOFFA, 2000; OKULLO *et al.*, 2004). Des études récentes ont mentionné les effets bénéfiques de la présence de ces deux espèces sur les champs agricoles et montré que la litière foliaire provenant de celles-ci contribue à promouvoir l'activité biologique des sols (YOUNG, 1995) et à améliorer leurs propriétés physiques telles que la porosité, la structure et la capacité de rétention en eau (KATER *et al.*, 1992; KESSLER, 1992; TRAORE *et al.*, 2004). Des effets similaires ont également été constatés sur les sols avec l'apport du compost (OUEDRAOGO *et al.*, 2001). Très peu de connaissances existent sur l'influence de la canopée des végétaux sur les propriétés hydrodynamiques des sols telles que l'infiltrabilité et la sorptivité.

Dans ce chapitre, nous essayons d'évaluer l'impact respectif de *Faidherbia*, du karité et de l'apport du compost sur l'infiltrabilité et la sorptivité des sols cultivés, et de comparer cette infiltrabilité avec les intensités de pluie mesurées en 2004, 2005 et 2006.

Nous présumons que l'infiltrabilité du sol serait plus élevée sous le houppier des arbres qu'en dehors du houppier et que l'apport complémentaire du compost et de la fertilisation minérale pourrait augmenter l'infiltrabilité et la sorptivité du sol.

1. Matériel et méthodes

1.1. L'infiltrabilité du sol

1.1.1. Définition

L'infiltrabilité est une des caractéristiques majeures des sols permettant de décrire leur comportement hydrodynamique. Elle est définie comme un processus au cours duquel l'eau pénètre dans le sol et, généralement, par un mouvement descendant à travers toute ou une partie de sa surface (HILLEL, 2004).

L'infiltrabilité a été déterminée *in situ* en conditions non saturées au cours de la saison sèche de l'année 2005 et 2006 en utilisant un infiltromètre à disque (infiltromètre à Plexiglas, model SW 080 B, Paris, France) et un infiltromètre à double anneau (Figure 12).

Une description détaillée du mode de fonctionnement des infiltromètres à disque et à double anneau est donnée respectivement par REYNOLD et ELRICK (1990) et COQUET *et al.* (2000).

1.1.2. Théorie

Le principe de l'infiltromètre à disques repose sur les lois de l'infiltration tridimensionnelle et axisymétrique. Selon la théorie développée par PHILIP (1969), l'infiltration peut être caractérisée par deux paramètres : la conductivité hydraulique, K_0 , qui représente la contribution gravitaire de l'écoulement et la sorptivité, S_0 , qui rend compte de l'aptitude du sol à absorber l'eau par capillarité, abstraction faite de tout effet gravitaire. L'équation proposée par PHILIP (1957) pour calculer le flux d'infiltration dans le cas d'un écoulement monodimensionnel s'écrit :

$$I(t) = S\sqrt{t} + At \quad (2)$$

$$i = \frac{dI}{dt} = \frac{S}{2}t^{-1/2} + A \quad (3)$$

où ' I ' est la lame d'eau infiltrée (mm) au cours du temps ' t ' (h), ' i ' est l'infiltrabilité (mm h^{-1}), S est la sorptivité ($\text{mm h}^{-1/2}$) et A (mm h^{-1}) une constante appelée transmissivité.

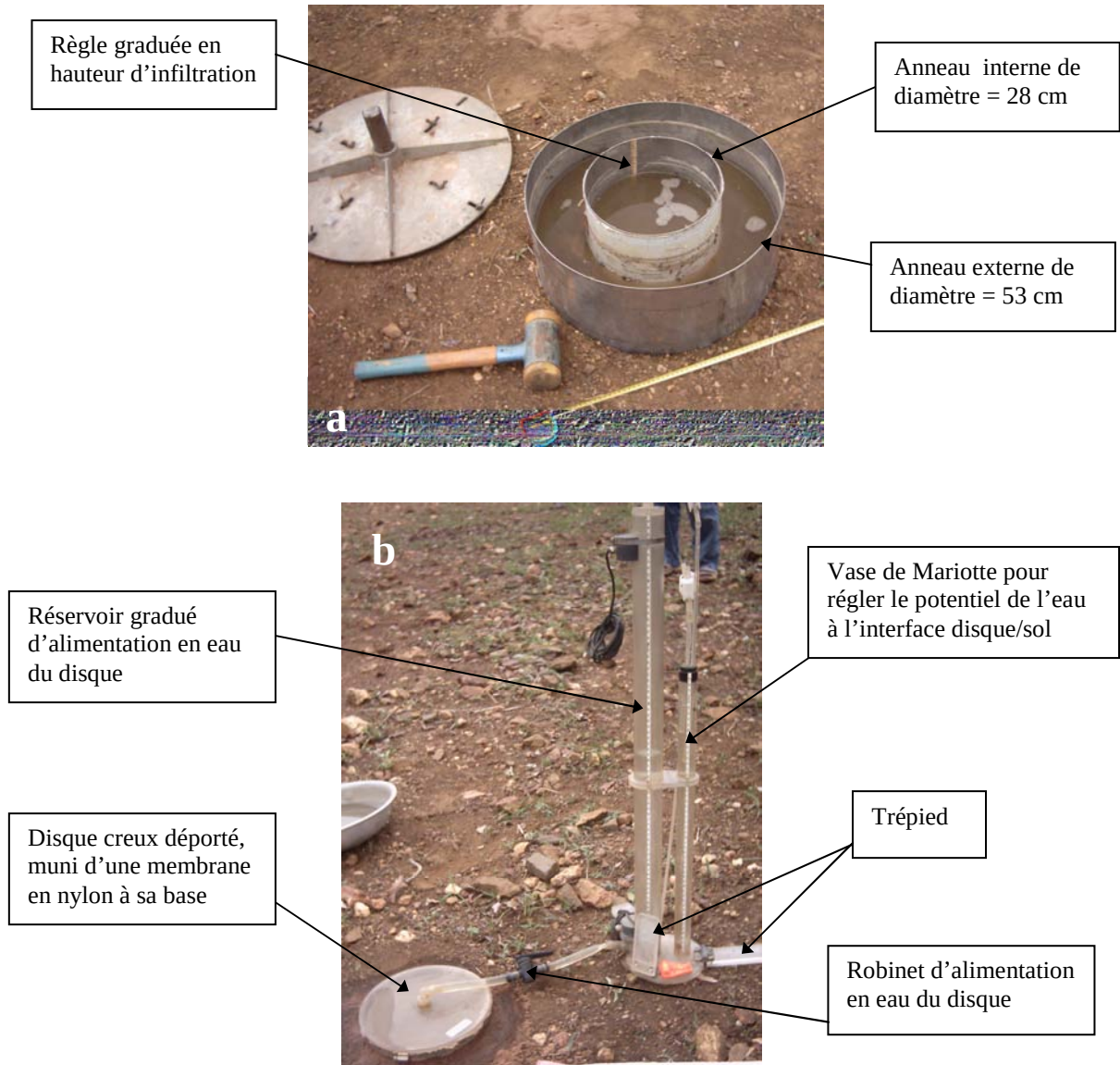


Figure 12. Dispositifs de mesure de l'infiltrabilité du sol. Infiltromètre à double anneau (a) et à disque (b).

Dans le cas d'un écoulement tridimensionnel émanant d'une source circulaire de rayon r placée à la surface du sol, sous une pression effective h_0 (cm) (négative, nulle ou positive), l'équation de Philip (2) a été modifiée par HAVERKAMP *et al.* (1994) pour rendre compte du caractère axisymétrique de l'infiltration :

$$I(t) = S\sqrt{t} + \frac{2-\beta}{3}K(h_0)t + \frac{\gamma S^2(\theta_0, \theta_i)}{r(\theta_0 - \theta_i)}t \quad (4)$$

où γ est une constante approximativement égale à 0,7 (ANGULO-JARAMILLO *et al.*, 2000);

β est un paramètre dépendant de la capillarité et ayant une valeur moyenne de 0,6 (VANDERVAERE *et al.*, 1997) ; r est le rayon du disque (cm) ; θ_0 et θ_i sont respectivement la teneur volumique en eau du sol des conditions finales et initiales ($\text{cm}^3\text{cm}^{-3}$) et $K(h_0)$ représente la conductivité hydraulique (cm h^{-1}) à la pression h_0 . Les valeurs de $K(h_0)$ sont obtenues à partir de la densité de flux d'infiltration en régime permanent à la surface du sol $Q(h_0)$ (cm h^{-1}) mesurée à des pressions successives (h), (REYNOLDS et ELRICK, 1991) et en intégrant la solution établie par WOODING (1968) et basée sur une fonction $K(h_0)$ de forme exponentielle (GARDNER, 1958):

$$Q(h_0) = K(h_0) \left[1 + \frac{4}{\pi \alpha} \right] = K_s \exp(\alpha h_0) \left[1 + \frac{4}{\pi \alpha} \right] \quad (5)$$

où K_s (cm h^{-1}) est la conductivité hydraulique à saturation et α (cm^{-1}), un paramètre dépendant de la texture et de la structure du sol (annexe 5). En supposant α constant sur l'intervalle de deux pressions successives h_1 et h_2 avec des flux d'infiltration respectifs $Q(h_1)$ et $Q(h_2)$ (ANKENY *et al.*, 1991; REYNOLDS et ELRICK, 1991), la relation suivante permet de déduire α :

$$\alpha = \frac{\ln[Q(h_2)/Q(h_1)]}{h_2 - h_1} \quad (6)$$

Si l'on dispose de plus de deux couples de mesures, on peut utiliser la forme logarithmique de l'équation (5) et faire une estimation de α et K_s (COQUET *et al.*, 2000) par régression linéaire. La sorptivité peut s'obtenir par régression sur les parties initiales de la cinétique d'infiltration de l'équation (2) en fonction de $\sqrt{t}$ ou à partir du potentiel de flux matriciel $\phi(h_0)$ ($\text{cm}^2 \text{h}^{-1}$) qui rend compte de l'effet de la capillarité dans l'écoulement sous la surface d'apport (LOGSDON et JAYNES, 1993). Il s'exprime par :

$$\phi(h_0) = \frac{bS^2(\theta_0, \theta_i)}{\theta_0 - \theta_i} \quad (7)$$

où les valeurs théoriques de b sont limitées à l'intervalle $[1/2 ; \pi/4]$. La valeur $b = 0,55$ convient dans la plupart des cas (COQUET *et al.*, 2000). La combinaison des équations (5) et (7) donne :

$$Q(h_0) = K(h_0) + \frac{4bS^2(\theta_0, \theta_i)}{\pi(\theta_0 - \theta_i)} \quad (8)$$

1.2. Caractéristiques structurales du sol et infiltrabilité

1.2.1. Caractérisation physique du sol

La structure du sol est le principal facteur qui contrôle un certain nombre de processus dans le sol, en particulier les processus de transfert de l'eau. Les paramètres texturaux quantitatifs susceptibles d'être corrélés à l'infiltrabilité du sol sont, entre autres, la composition granulométrique, la teneur en carbone organique ou matière organique, la densité apparente et la porosité. Pour déterminer ces paramètres, des échantillons de sol ont été prélevés à 0-10, 10-20 et 20-30cm de profondeur, dans les parcs à *Faidherbia* et à karité sur des placettes situées sous et en dehors des houppiers des arbres. Trois échantillons de chaque placette ont été mélangés pour former un échantillon composite. Le sol a été séché au soleil et tamisé à 2 mm avant d'être analysé au laboratoire. La composition granulométrique et la teneur en carbone organique du sol ont été déterminées respectivement par analyse mécanique (BUNASOLS, 1987) et par la méthode de Walkley et Black (WALKLEY et BLACK, 1934). La densité apparente a été mesurée sur 108 échantillons de sol non perturbés prélevés à l'aide d'un cylindre de volume intérieur de 500 cm³ (MATHIEU et PIELTAIN, 1998).

1.2.2. Macroporosité du sol et infiltrabilité

La mesure de la conductivité hydraulique du sol à l'aide d'un infiltromètre à succion contrôlée (ANGULO-JARAMILLO *et al.*, 2000) permet de détailler la relation conductivité hydraulique-potentiel matriciel de l'eau et d'en déduire des informations sur la contribution des différents compartiments de l'espace poral du sol au processus d'infiltration de l'eau. En effet, l'utilisation d'une gamme de potentiels de l'eau entre -10 et 0 cm de hauteur de colonne d'eau (entre -1 et 0 kPa) à l'interface disque/sol correspond, en référence au modèle capillaire, à des pores du sol de diamètre équivalent supérieur à 0,3 mm. En assimilant l'espace poral à un faisceau de tubes capillaires (MARSHALL, 1958), on peut établir une relation entre la valeur du potentiel de l'eau dans le sol et la valeur maximale du rayon des pores occupés par l'eau (ROWELL, 1994). Cette relation s'écrit :

$$r = -\frac{2\sigma \cos \alpha}{\rho g h} \approx -\frac{0,1482}{h} \quad (9)$$

avec σ : la tension superficielle entre l'eau et l'air [kg/sec² = N/m], α : l'angle de contact entre l'eau et la paroi du pore (supposé nul), ρ : la masse volumique de l'eau [kg/m³], g : l'accélération due à la pesanteur [m/sec²], h : la pression de l'eau (cm H₂O) et r le rayon équivalent du pore (cm).

Si le sol est assimilé à un faisceau de tubes capillaires rectilignes et de diamètre constant, le débit total de l'eau qui traverse ce faisceau peut être estimé en additionnant les débits élémentaires de chaque tube calculés par l'équation de Poiseuille.

En prenant le rayon équivalent minimum $r_{\min}$ de la classe de taille de pores dans lesquels transite le flux Δq (débit par unité de surface) qui est la différence entre les flux asymptotiques mesurés à deux suctions données et en utilisant l'équation de Poiseuille, le nombre maximum N de pores par unité de surface de la classe de taille impliquée est donné par la relation :

$$N = 8\eta\Delta q / \pi\rho g(r_{\min})^4 \quad (10)$$

avec η : la viscosité dynamique de l'eau en kg/m/s, ρ : la masse volumique de l'eau en kg/m³, g : l'accélération due à la pesanteur en m/s², Δq en m/s et $r_{\min}$ en m.

Nous avons utilisé dans les calculs la valeur de la viscosité dynamique à 30 °C, soit $\eta = 0,798 \times 10^{-3}$ kg/m/s.

On en déduit la porosité fonctionnelle Θ (m³/m³) qui n'est autre que la porosité qui participe effectivement à l'écoulement de l'eau dans une classe de taille de pore donnée.

Θ est estimée en recourant conjointement à la théorie capillaire et à la loi de Poiseuille :

$$\Theta = N\pi(r_{\min})^2 \quad (11)$$

1.3. Pluviosité et infiltrabilité du sol

De part sa grande variabilité dans le temps et dans l'espace, la pluie est le principal facteur climatique qui influe sur la variation des rendements agricoles. Dans les régions semi-arides les précipitations annuelles sont caractérisées par des intensités très variables que partout ailleurs (SIVAKUMAR et GNOUMOU, 1987).

L'intensité des pluies et l'infiltrabilité du sol sont deux paramètres qui déterminent l'infiltration effective de l'eau dans le sol et la recharge des nappes souterraines. La distribution temporelle des pluies a été évaluée à l'aide d'un pluviomètre enregistreur (modèle ARG 100, Campbell, UK) équipé d'un système d'acquisition automatique des hauteurs d'eau précipitées au pas de temps de 30 minutes (modèle CR10X, Campbell, Logan, Utah, USA). Les quantités de pluie enregistrées chaque année entre 2004 et 2006 ont été analysées en termes de séries de hauteurs de pluies calculées à des intervalles de temps de ½ h, 1 h et 2 h.

Les intensités des pluies déduites de ces séries ont été classées par ordre croissant et distribuées de façon cumulative pour chaque année. Cette distribution a été exprimée en fonction du pourcentage de la précipitation totale annuelle.

1.4. Les tests d'infiltration

1.4.1. Dispositif des tests

Les tests d'infiltration ont été réalisés au cours de la saison sèche 2006 après les récoltes, sur des parcelles situées sous et hors houppier dans les parcs à *V. paradoxa* et *F. albida*. Les parcelles ont été regroupées suivant un dispositif en split-plot en quatre blocs dans chaque parc. Chaque bloc a été subdivisé en deux sous blocks correspondant aux deux traitements principaux le sous et le hors houppier ; chaque sous bloc a été subdivisé en parcelles élémentaires de dimension 4 m x 6 m dans lesquelles ont été appliqués des traitements de fertilisation : (a) témoin, (b) apport de 80kg/ha d'azote minéral, (c) apport de compost équivalent à 80kg/ha d'azote minéral et (f) apport de feuilles fraîches de karité équivalent à 40kg/ha d'azote minéral. Ce dernier traitement a été appliqué seulement dans le parc à *F. albida*. La teneur en azote (N) des feuilles fraîches de karité est de 1,56% (BAYALA *et al.*, 2003). Tous les traitements ont également reçu un supplément en phosphore (P) et en potassium (K) à la dose respective de 50 kg/ha du Superphosphate Triple (TSP; 46% P_2O_5) et 40 kg/ha du chlorure de potassium (KCl ; 60% K_2O). Ces doses d'engrais correspondent à la fumure minérale vulgarisée en culture intensive sur le maïs. Le nombre de parcelles élémentaires était de 36 dans le parc à *F. albida* et de 24 dans le parc à *V. paradoxa*. Les traitements ont été appliqués au cours des saisons 2004, 2005.

Le compost utilisé au cours de l'expérimentation provenait des fosses fumières des producteurs et dosait 0,7 % d'azote, 0,3 % de phosphore et 15 % de carbone.

Les tests d'infiltration ont été effectués sur chaque parcelle élémentaire en utilisant trois niveaux de potentiels de l'eau : -10 cm, -5 cm et 0 cm de hauteur de colonne d'eau, soit -10 kPa, -5 kPa et 0 kPa. Le disque de l'infiltromètre avait un diamètre de 20 cm. Sur un même emplacement de chacune des 56 parcelles élémentaires, le test d'infiltration a consisté à appliquer successivement les potentiels de l'eau, sélectionnés dans l'ordre croissant, et à suivre les variations du niveau de l'eau dans le réservoir jusqu'à ce que le flux mesuré soit stable et constant au cours du temps.

Sur deux autres emplacements différents et proches du premier, un test d'infiltration à la pression 0 kPa avec le disque et un autre test à charge constante de 5 cm d'eau avec le double anneau ont été effectués. A chaque emplacement du test d'infiltration, la surface du sol

est éliminée de ses aspérités en plaçant une mince couche de sable fin légèrement mouillé de manière à obtenir une surface plane et horizontale pour améliorer le contact hydraulique entre le sol et le disque.

1.4.2. Analyse statistique

Les données sur l'infiltration ont été analysées suivant le Modèle Linéaire Général (MLG) du logiciel statistique Minitab Release 14 (Mintab Inc.). Le modèle split-plot suivant a été appliqué séparément aux deux types de parc :

$$y_{ijk} = \mu + \alpha_i + \beta_k + \gamma_{ik} + b_j + c_{ij} + d_{kj} + \varepsilon_{ikj} \quad (12)$$

où la moyenne générale est représentée par μ , le houppier par i , les différents traitements par k , la répétition par j , les interactions par ij , ik et kj et l'erreur par ε . Des tests d'homogénéité et de normalité ont été effectués sur les valeurs résiduelles. Les différences ont été considérées significatives lorsque la probabilité p est inférieure à 0,05 ($p < 0,05$) selon le test de Tukey.

2. Résultats et discussion

2.1. Caractéristiques physiques du sol

Selon le système de classification texturale des sols de l'USDA, le sol couramment rencontré dans les deux types de parc est de nature limono-argileuse (tableau VI). Le taux de matière organique est un peu plus élevé sous les houppiers qu'en dehors des houppiers des arbres (de 3,9 % à 1,3 %). La densité apparente du sol ne diffère pas significativement dans les deux parcs. La porosité totale est presque identique sur le profil considéré (0-30 cm) aussi bien sous les arbres qu'en dehors des arbres. Les amendements organiques et minéraux n'ont pas eu un impact significatif sur les caractéristiques physiques du sol décrites dans le tableau VI.

Tableau VI. Caractéristiques physiques du sol, sous et hors houppier de *Faidherbia* et du karité à Dossi, Burkina Faso. Les chiffres entre parenthèses représentent la déviation standard.

	Horizon du sol (cm)	Da (g cm ⁻³)	Granulométrie (%)			Porosité totale (%)	Matière organique (%)
			Sable (0,05-2mm)	Limon (2-50 μm)	Argile (2 μm)		
Parc à <i>Faidherbia</i>							
Sous houppier	0-15	1,24 (0,06)	29,4 (6,96)	38,7 (3,70)	31,9 (10,3)	53,3 (2,20)	2,5 (0,30)
	15-30	1,40 (0,11)	31,9 (9,60)	27,0 (4,30)	41,1 (9,10)	47,2 (4,40)	1,3 (0,20)
Hors houppier	0-15	1,31 (0,12)	35,8 (11,6)	34,3 (1,1)	29,9 (12,5)	50,7 (4,70)	1,9 (0,40)
	15-30	1,41 (0,10)	33,9 (14,7)	26,9 (1,80)	39,2 (13,1)	46,8 (3,60)	1,3 (0,20)
Parc à karité							
Sous houppier	0-15	1,26 (0,07)	29,9 (7,50)	37,8 (6,07)	32,3 (4,6)	52,4 (2,4)	3,9 (1,20)
	15-30	1,33 (0,08)	25,0 (7,50)	33,8 (6,60)	41,2 (8,20)	49,8 (3,10)	1,3 (0,20)
Hors houppier	0-15	1,28 (0,16)	30,9 (6,86)	38,2 (7,43)	30,9 (2,9)	51,7 (5,96)	2,2 (1,10)
	15-30	1,20 (0,07)	21,0 (6,70)	39,0 (8,40)	40,0 (10,4)	54,7 (2,66)	1,3 (0,20)

Da = Densité apparente

2.2. Effets des traitements sur l'infiltrabilité du sol

La figure 13 indique que l'infiltrabilité du sol est plus élevée sous le houppier qu'en dehors du houppier des arbres aussi bien dans le parc à karité que celui à *Faidherbia*.

L'analyse statistique a révélé que l'infiltrabilité est presque identique dans les deux parcs et ne diffère pas significativement entre les traitements de fertilisation.

La sorptivité n'est pas significativement différente entre ces traitements et les deux types de parc.

L'infiltrabilité mesurée à l'aide de l'infiltromètre à double anneau a été, en moyenne, de 40 mm h⁻¹ dans les parcelles situées en dehors des houppiers des arbres et de 53 mm h⁻¹ dans celles situées sous les houppiers (tableau VII). En revanche, les mesures effectuées avec l'infiltromètre à disques ont permis d'obtenir une infiltrabilité moyenne de 44 mm h⁻¹ sous le houppier et de 36 mm h⁻¹ en dehors du houppier.

Tableau VII. Propriétés hydrodynamiques du sol mesurées sous et hors houppier de *Faidherbia* et du karité à Dossi, Burkina Faso.

	Propriétés hydrauliques du sol	Houppier	Parc		Moyenne
			<i>F. albida</i>	<i>V. paradoxa</i>	
Infiltromètre à Double anneau	Infiltrabilité (mm h ⁻¹)	Sous	55 ± 10,63	51 ± 9,09	53
		Hors	39 ± 5,34	42 ± 7,31	40
	P _(0,05)		0.007	0.009	
	N		32	24	
Infiltromètre à Disques	Sorptivité (mm h ^{-1/2})	Sous	70 ± 12,08	53 ± 25,81	62
		Hors	66 ± 31,9	56 ± 15,94	61
	Infiltrabilité (mm h ⁻¹)	Sous	47 ± 10,11	40 ± 13,47	44
		Hors	39 ± 11,38	33 ± 8,84	36
	P _(0,05)		0.008	0.025	
	N		32	24	
	Sorptivité (mm h ^{-1/2})	Sous	41 ± 17,18	33 ± 16,81	37
		Hors	35 ± 15,13	31 ± 17,17	33

P_(0,05) = Valeurs de la probabilité calculée au seuil de 5% par la méthode GLM du Minitab Release 14

N = Nombre d'observations

La distribution cumulée (figure 14) des valeurs moyennes de l'infiltrabilité mesurées avec l'infiltromètre à double anneau, indique que moins de 10 % des mesures effectuées sous les houppiers et plus de 75 % de celles effectuées en dehors du houppier ont une infiltrabilité moyenne $\leq 40 \text{ mm h}^{-1}$.

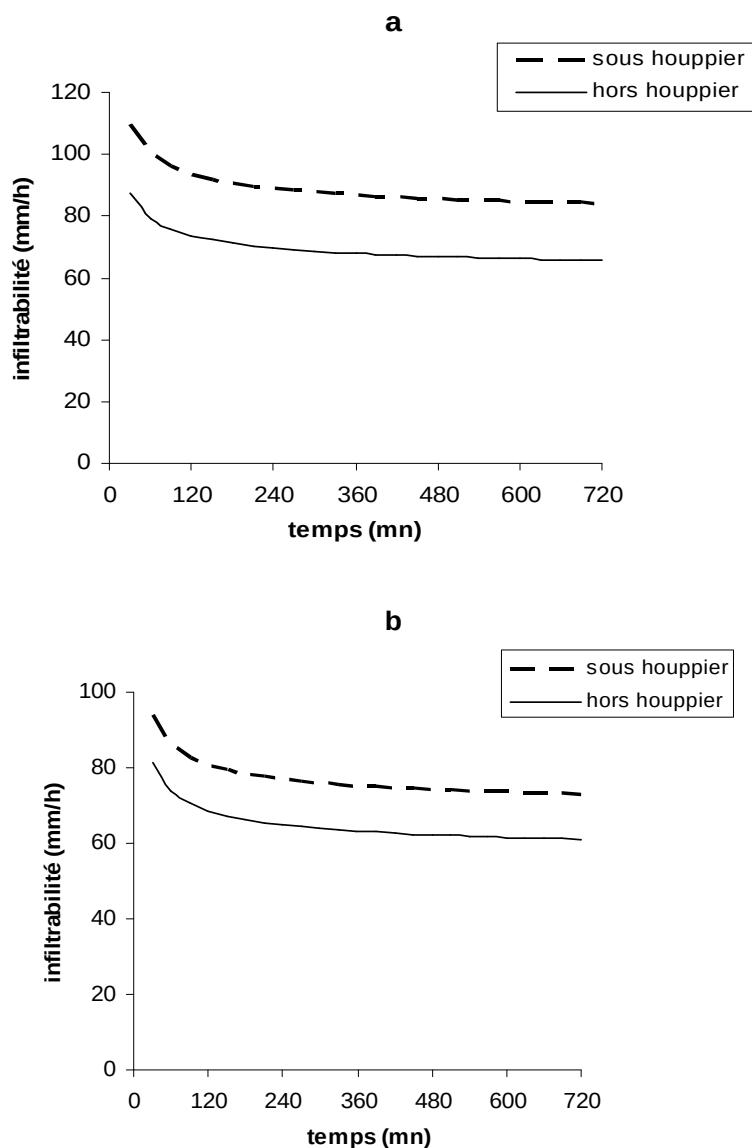


Figure 13. Evolution en fonction du temps de l'infiltrabilité du sol, sous et hors houppier des arbres dans les parcs à *Faidherbia* (a) et à *karité* (b). Dossi, Burkina Faso.

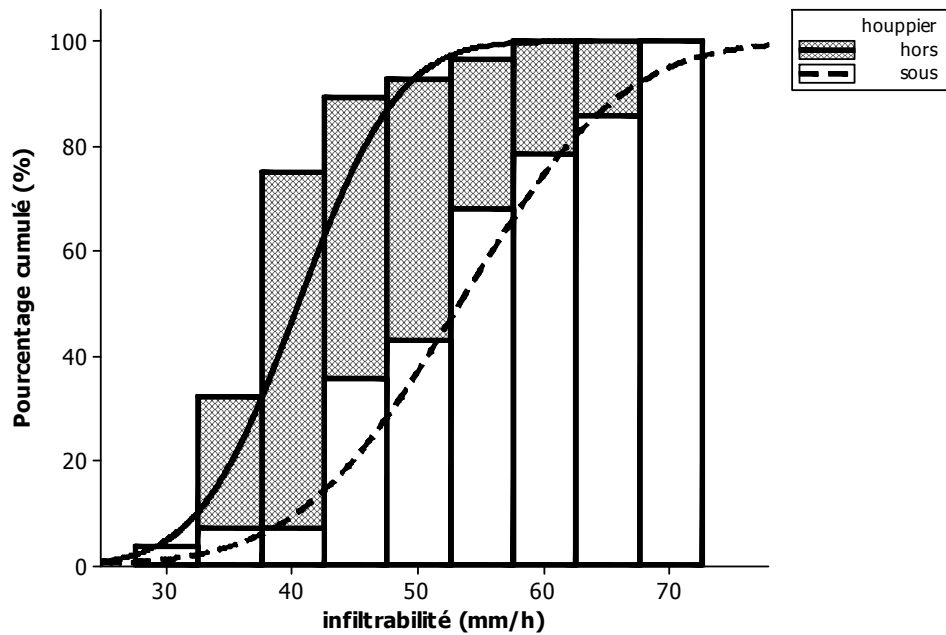


Figure 14. Fréquence de l'infiltrabilité mesurée sous et hors houppier des arbres dans les parcs à karité et à *Faidherbia*. Dossi, Burkina Faso.

L'augmentation de l'infiltrabilité sous le houppier pourrait être attribuée à une amélioration de la structure du sol, due aux effets combinés de la matière organique provenant des racines mortes, de la chute des feuilles et des branches sénescentes (DIAKITE, 1995; RHOADES, 1997; TOMLINSON *et al.*, 1998; TRAORE *et al.*, 2004) et de la très forte porosité capillaire causée par une intense activité biologique (pédofaune) (LAL, 1989c; DIAKITE, 1995).

La structure du sol peut également s'améliorer d'une part par la présence de petits tunnels générés par la décomposition des vieilles racines à travers lesquels l'eau s'infiltre facilement (VAN NOORDWIJK *et al.*, 1991) et d'autre part par l'apport des fientes d'oiseaux et des excréments des animaux qui se reposent et se nourrissent à l'ombre des arbres (BELSKY *et al.*, 1989; DEPOMMIER, 1996; TOMLINSON *et al.*, 1998).

Toutes ces retombées organiques, tout en améliorant la stabilité des agrégats du sol, contribuent à réduire la formation des surfaces encroûtées (OUEDRAOGO *et al.*, 2001; OUATTARA, 2007) et à stimuler la colonisation du sol par la macrofaune. L'activité de la macrofaune accélère les processus de décomposition de la matière organique et libère des éléments minéraux dans le sol (MANDO, 1997).

La comparaison entre la teneur de la matière organique des sols situés sous et en dehors du houppier des arbres et leur infiltrabilité, indique qu'il existe une bonne relation

entre les deux variables (figure 15). Cette relation se traduit par une augmentation de l'infiltrabilité pour des valeurs plus élevées de la teneur en matière organique du sol (BAYALA *et al.*, 2003). Ainsi, 42 % des variations de l'infiltrabilité seraient gouvernées par la matière organique du sol dans les parcs à *Faidherbia* contre 44 % dans les parcs à karité.

La pente de la régression linéaire qui est relativement plus forte pour le *Faidherbia* que pour le karité (figure 13), indique une fois de plus que la litière foliaire du *Faidherbia* dont la décomposition est beaucoup plus rapide à cause de sa teneur élevée en azote (GNANKAMBARY *et al.*, in press) ne favorise pas une accumulation suffisante de la matière organique dans le sol. En dépit de ce constat, l'infiltrabilité demeure plus élevée sous les houppiers. Selon MALMER *et al.* (1999), cette amélioration de l'infiltrabilité n'est pas seulement due à l'effet direct de la teneur en matière organique du sol mais plutôt aux effets combinés des activités de creusage de la macrofaune, de l'agrégation du sol et de la décomposition de la matière organique.

Il a été comparé au cours de cette étude l'infiltrabilité du sol sous et en dehors du houppier dans des parcs dont la densité ligneuse variait de 10 à 30 arbres/ha. Cette relative forte concentration des arbres dans les parcs a probablement contribué à réduire davantage les écarts entre l'infiltrabilité mesurée sous et en dehors des houppiers. Ces écarts seraient plus importants si la densité des arbres dans les parcs était plus faible.

OUATTARA *et al.* (2007) ont ainsi noté que dans les espaces dépourvus d'arbres des parcs cultivés à Bondoukuy (Burkina Faso), l'infiltrabilité variait de 14 à 25 mm h⁻¹ sur les Luvisols ferriques et de 36 à 142 mm h⁻¹ sur les lixisols. Les résultats de cette étude sur l'infiltrabilité du sol sous les houppiers des arbres sont comparables avec ceux précédemment obtenus par SAVADOGO *et al.* (2007) dans les zones de savanes arborées réservées au pâturage. Selon ces auteurs, l'infiltrabilité mesurée en dehors des houppiers des arbres est relativement très faible et celle-ci serait de l'ordre de 21 mm h⁻¹ pour les zones à pâturage intensif (8 animaux par jour et par ha) protégées contre le feu et de 16 mm h⁻¹ pour les zones non protégées. Dans les zones protégées contre le feu depuis douze ans et soumises à un pâturage moins intensif, l'infiltrabilité du sol demeure toutefois un peu plus élevée et varie de 49 à 123 mm h⁻¹.

En contraste avec l'effet des houppiers, l'adjonction du compost, de la fumure minérale et de la litière foliaire n'a pas significativement amélioré l'infiltrabilité du sol. L'absence de cet effet serait en partie due au délai relativement court entre les apports et l'évaluation de l'étude (OUEDRAOGO *et al.*, 2001; OUATTARA *et al.*, 2007). En effet, l'apport du compost et de la litière foliaire a été effectué en 2004 et 2005 et probablement ce

laps de temps n'a pu occasionner une altération accrue, comparé aux longues années de présence des arbres sur le site (HANSSON, 2006). Par ailleurs, BAYALA *et al.* (2003) qui ont travaillé durant deux années sur l'utilisation des feuilles de néré et du karité comme paillis dans les parcs agricoles, ont noté que le paillage du sol ne permettait pas d'améliorer significativement l'infiltrabilité. Des tendances similaires à des degrés de signification variables avaient été constatées après trois années d'apport du compost sur les Luvisols et les Lixisols des champs cultivés (OUATTARA *et al.*, 2007).

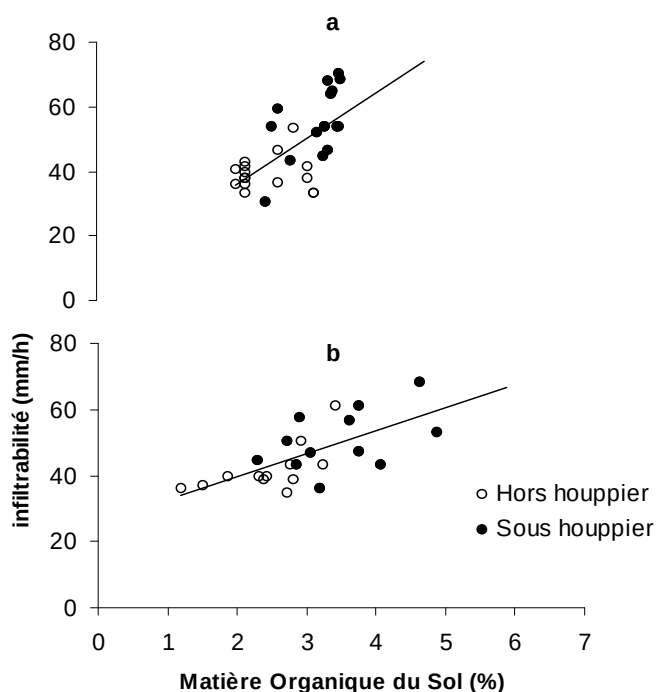


Figure 15. Relation entre la matière organique et l'infiltrabilité du sol, sous et hors houppier des arbres dans les parcs à *Faidherbia* (a) et à karité (b). Dossi, Burkina Faso.

2.3. Relation entre la porosité et l'infiltrabilité du sol

L'utilisation de la gamme de potentiel de l'eau entre -10 cm et 0 cm permet de définir des macropores de rayon équivalent à 300 μm pour les pressions supérieures ou égales à -5 cm et ceux de rayon équivalent à 150 μm actifs à des pressions comprises entre -5 cm et -10 cm.

Les résultats du tableau VIII indiquent que quel que soit le type de parc, la densité des macropores est plus élevée sous le houppier qu'en dehors du houppier. Cette densité est d'autant plus élevée pour les macropores de rayon équivalent à 150 μm dont la porosité fonctionnelle est de deux ordres de grandeur plus élevée que celle des macropores de 300 μm de rayon. Les valeurs de la porosité fonctionnelle sont significativement plus élevées sous le houppier qu'en dehors du houppier excepté celles des macropores de 300 μm de rayon du parc à karité. Elles varient de 0,0093 % du volume de sol sous le houppier du faidherbia à 0,0079 % en dehors du houppier et sous le houppier du karité. Pour les macropores de 300 μm de rayon, la porosité fonctionnelle est de l'ordre de 0,004 % du volume de sol dans les deux types de parc.

Tableau VIII. Contribution des composantes du système macro-poral à l'écoulement de l'eau.

	Pression de l'eau (- cm H ₂ O)	$r_{\min}$ (mm)	N (nombre/m ²)		Θ (%)		$P_{(0,05)}$
			Sous houppier	Hors houppier	Sous houppier	Hors houppier	
Parc à F. <i>albida</i>	0-5	0,3	168	145	0,0047	0,0041	0,011
	5-10	0,15	1322	1116	0,0093	0,0079	0,008
Parc à V. <i>paradoxa</i>	0-5	0,3	158	144	0,0044	0,004	0,108
	5-10	0,15	1123	903	0,0079	0,0064	0,017

$r_{\min}$ = Rayon équivalent minimum de la classe de pores dans lesquels transite le flux Δq .

N = Nombre de pores cylindriques par unités de surface.

Θ = Porosité fonctionnelle estimée en utilisant la théorie capillaire et la loi de Poiseuille (% du volume de sol).

$P_{(0,05)}$ = Valeurs de la probabilité calculée au seuil de 5% par la méthode GLM du Minitab Release 14

La différence de l'infiltrabilité du sol due à l'effet du houppier n'est pas significative aux potentiels d'infiltration de -10 cm et -5 cm (figure 16). L'infiltrabilité a été en moyenne de 10 mm h⁻¹ à -10 cm de pression et de 20 mm h⁻¹ à -5 cm de pression dans les deux parcs.

La valeur calculée de α qui est un paramètre dépendant de la structure et de la texture du sol n'a pas été significativement affectée par les traitements de fertilisation.

L'accroissement de l'infiltrabilité observée entre -10 cm et 0 cm de pression appliquée est probablement dû à la mise en fonctionnement de pores de taille de plus en plus grande, au fur et à mesure que le sol se rapproche de la saturation. Ces macropores dont l'arrangement, la distribution et les dimensions sont souvent influencés par la nature du sol, les pratiques agricoles et les événements pluviaux (OUATTARA *et al.*, 2007) semblent relativement plus

abondants sous les arbres que les micropores ; ce qui explique la différence significative de l'infiltrabilité constatée à la pression 0 cm entre les houppiers des arbres.

La différence des valeurs de l'infiltrabilité constatée entre le double anneau et le disque pourrait s'expliquer par leur principe de fonctionnement. En effet, la charge constante d'eau maintenue dans l'infiltromètre à double anneau a tendance à maximiser plus la pression hydrostatique et les effets de la gravité sur l'écoulement que ceux de la capillarité (REYNOLD et ELRICK, 1990). Selon RYNOLDS et ELRICK (1991) l'insertion du double anneau dans le sol peut également dénaturer le sol à travers la rupture de la macrostructure ou l'éclatement du sol lorsqu'il est sec. L'écoulement de l'eau imposé par le disque est tridirectionnel et résulte des effets combinés de la capillarité, de la gravité et de la géométrie d'apport (ANGULO-JARAMILLO *et al.*, 2000). L'apport du sable fin pour améliorer le contact hydraulique entre le sol et le disque pourrait créer une barrière capillaire en bloquant les pores de taille plus grande et contribuer ainsi à réduire le flux d'infiltration.

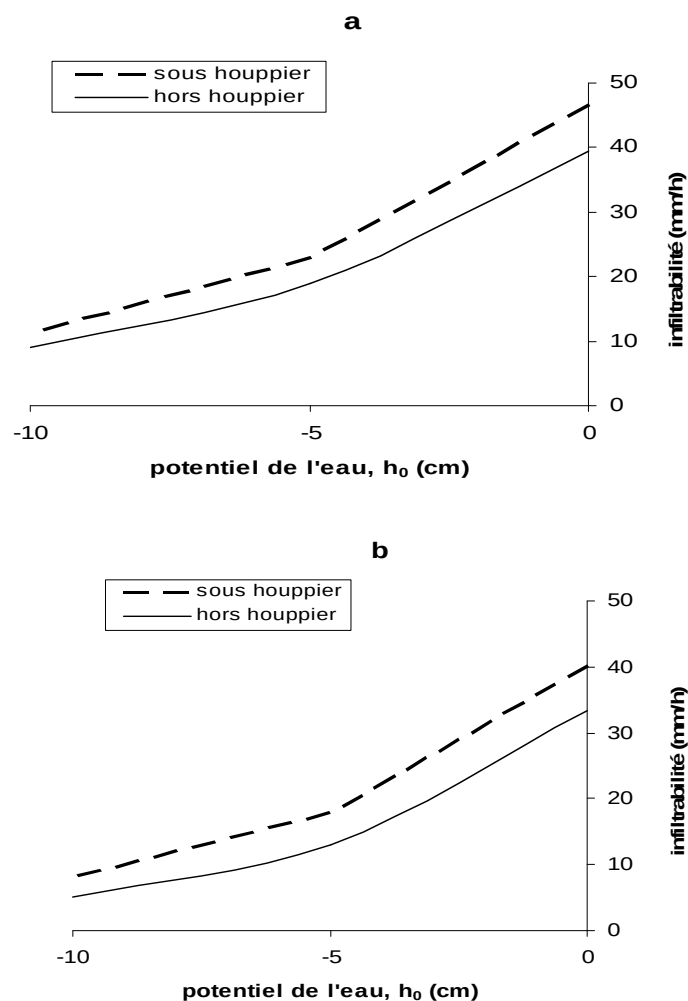


Figure 16. Infiltrabilité du sol aux potentiels 0, -5 et -10 cm, sous et hors houppier des arbres dans les parcs à *Faidherbia* (a) et à karité (b). Dossi, Burkina Faso.

2.4. Relation entre l'intensité des pluies et l'infiltrabilité du sol

La pluviosité dans la zone de Dossi est très variable et intense. La quantité de pluie enregistrée pendant l'hivernage a été de 610 mm en 2004, 878 mm en 2005 et 986 mm en 2006. Les pluies ont été d'une intensité très variable et d'une durée moyenne comprise entre ½ heures et 2 heures. L'analyse des précipitations annuelles des trois années montre que pour une durée de ½ heures, 10 à 40 % des pluies sont d'une intensité égale à 40 mm/h contre 20 % d'une intensité égale à 60 mm/h. Pour 1 heure de durée, seulement 20 % des pluies sont d'une intensité de 40 mm/h et 5 % des pluies ont une intensité de 60 mm/h (figure 17).

L'augmentation de l'infiltrabilité du sol peut entraîner ou non une recharge en eau du sol ou des nappes souterraines. Le ruissellement des eaux de surfaces a lieu si l'intensité des pluies est plus élevée que l'infiltrabilité du sol.

De l'analyse des trois années de mesure d'intensité des pluies, il ressort qu'une grande partie des précipitations annuelles tombe avec une intensité beaucoup plus élevée que l'infiltrabilité du sol. En effet, plus de 30 % de la pluviométrie annuelle sont tombés à des intensités excédant 40 mm/h. Des données similaires avaient été enregistrées dans le Sahel au Mali par HOOGMOED et STROOSNIJDER (1984) qui, pendant trois ans, ont trouvé que 20 à 40 % de la pluviométrie annuelle tombaient avec une intensité ≥ 50 mm/h.

Si l'on considère l'infiltrabilité du sol dans cette étude comme une grandeur à forte variabilité spatiale, la combinaison de l'intensité des pluies (Figure 17) et de l'infiltrabilité (Figure 14) indique par exemple que pour une intensité pluviométrique ≥ 50 mm/h, l'infiltration des eaux de pluie sans aucun ruissellement serait effective dans 60 % des espaces situés sous les houppiers des arbres et seulement dans 10 % des espaces situés en dehors des houppiers. Sous les houppiers, il est possible que le ruissellement qui débute dans les espaces où l'infiltrabilité du sol est faible, s'estompe dans les espaces immédiats où l'infiltrabilité est plus élevée. Cette infiltration par paliers est moins évident pour les espaces situés en dehors des houppiers des arbres. Dans les zones semi-arides, l'habilité des sols à infiltrer les eaux de pluie pendant les courtes saisons pluvieuses, est d'une importance certaine pour la recharge en eau des nappes souterraines.

Il est possible également que l'amélioration de l'infiltrabilité du sol par les arbres compense en partie leur transpiration. Dans les parcs à *Faidherbia* et à karité, il a été démontré que la productivité des cultures était particulièrement plus élevée sous les arbres au cours des années sèches (GNANKAMBARY, 2007). Selon BONELL (1993), cette situation serait sans doute favorisée par une remontée des eaux des nappes à travers des macropores

différents de ceux de la zone racinaire responsable de la transpiration des arbres. De tels macropores sont souvent présents dans les zones fermes situées en dessous des surfaces cultivées mais des données d'études comparant l'influence des arbres sur l'abondance et les fonctions de ces macropores, sont insuffisantes et disparates de nos jours.

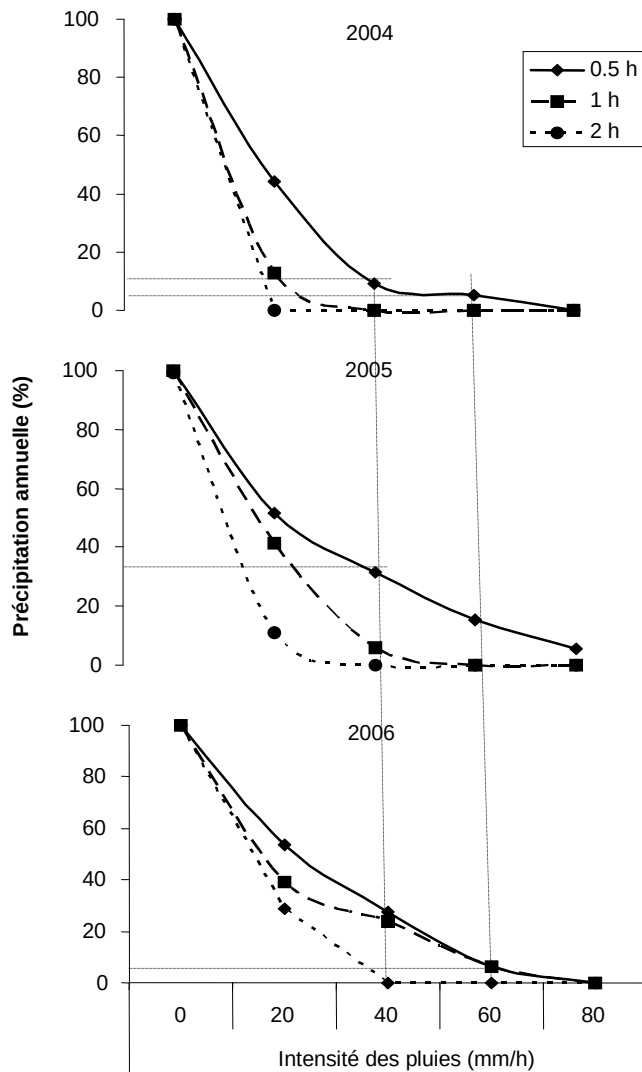


Figure 17. Distribution de l'intensité des pluies (mm h^{-1}) exprimée en fonction du pourcentage de la pluviométrie annuelle de 2004, 2005 et 2006 et de la durée effective des pluies de $\frac{1}{2}$ h, 1h et 2 h. Dossi, Burkina Faso.

Conclusion partielle

Les analyses et observations faites dans ce chapitre montrent que la présence des arbres de karité et de *Faidherbia* dans les champs agricoles joue un rôle prépondérant dans l'amélioration de l'infiltrabilité des sols. L'infiltrabilité du sol sous les houppiers des arbres dispersés dans les champs a été en moyenne de 33 % plus élevée qu'en dehors des houppiers. Les sols situés en dehors du houppier des arbres dont l'infiltrabilité a été en deçà des intensités courantes des pluies, contribuent à favoriser le ruissellement dans les parcs et à réduire la recharge en eau des nappes souterraines.

L'effet du compost et de la litière foliaire sur l'infiltrabilité et la sorptivité n'a pas été clairement établi compte tenu du délai relativement court de l'expérimentation. Des expérimentations à long terme sur l'utilisation de ces amendements organiques permettraient de démontrer de tels effets. Des observations complémentaires sont aussi nécessaires pour déterminer la contribution des ligneux dans la recharge des nappes souterraines qui constituent des réserves d'appoint pour les cultures en cas de sécheresse.

CHAPITRE IV

Influence des deux espèces agroforestières sur la dynamique de l'eau
dans le sol et la productivité des cultures dans les agrosystèmes

Introduction

Dans la zone soudano-sahélienne les systèmes agroforestiers d'origine ancienne se développent dans les milieux à forte tradition agricole et à forte densité de population. Les systèmes agroforestiers ou parcs agroforestiers sont définis de nos jours comme des systèmes agraires placés à l'abri d'arbres dominants en faible densité et dont les houppiers épars ne forment pas un couvert continu (DEPOMMIER, 1996). Le parc tire généralement son nom de l'espèce dominante. Ainsi, au Burkina Faso les parcs à *Faidherbia* et à karité sont très répandus et dans sa partie ouest, ces parcs sont souvent de nature monospécifique. *F. albida* est une espèce qui, émondée, fournit aux troupeaux du fourrage de grande qualité nutritionnelle en période de soudure. En outre, les producteurs agricoles lui reconnaissent un effet améliorant du rendement de certaines cultures, en particulier céréalières.

VANDENBELDT (1992) avait qualifié cet effet d'« effet albida ». L'effet de l'arbre sur les rendements se justifie en partie par les changements intervenant dans la fertilité des sols et le microclimat (DEPOMMIER, 1996; RHOADES, 1997; KHO *et al.*, 2001).

L'un des traits caractéristiques de *Faidherbia* repose sur sa phénologie inversée. L'arbre est complètement defeuillé pendant la saison des pluies, et la compétition avec les cultures pour la lumière, l'eau et les éléments nutritifs, devient minimale. Les branches dénudées contribuent à réduire l'évapotranspiration et à augmenter l'humidité relative de l'air sous les arbres.

RHOADES (1997) a constaté, au cours d'une saison culturale, que l'humidité du sol au voisinage de la zone racinaire des cultures était de 4 à 53 % plus élevée sous *Faidherbia* qu'en zone découverte. Contrairement au cas de *Faidherbia*, le comportement des cultures à proximité du karité peut être influencé de façon négative. La réduction des rendements est importante au voisinage du tronc de l'arbre et devient moins prononcée à mesure que l'on s'éloigne du tronc (KESSLER, 1992; BAYALA *et al.*, 2002; ZOMBOUDRE *et al.*, 2005b).

La baisse du rendement sous le karité est surtout attribuée à l'insuffisance de l'intensité lumineuse dont une grande partie est interceptée par les houppiers. En dépit de cette restriction de la lumière, le karité contribue également à améliorer la fertilité des sols (RHOADES, 1997; BAYALA *et al.*, 2003) et le microclimat en réduisant l'évapotranspiration et la vitesse du vent (JONSSON, 1995).

Pour améliorer les rendements des cultures, des pratiques de conservation des sols ou de fertilisation sont adoptées par les exploitants agricoles du terroir en complément de l'application des technologies agroforestières. Il s'agit en particulier des labours en début d'hivernage et des apports d'engrais minéraux et organiques.

Selon DEPOMMIER (1996), l'utilisation de l'engrais minéral est limitée par le coût et celle du fumier et du compost par la taille du cheptel animal et la disponibilité de la paille. Les quantités de ces engrais appliquées par les paysans varient d'une saison à l'autre et ne suffisent plus à couvrir les superficies exploitées. Dans ce contexte, une alternative qui consiste à combiner la fumure minérale avec différents types d'apport organique serait bénéfique pour les fermiers et permettrait d'améliorer les propriétés physiques et chimiques des sols et les rendements des cultures (OUEDRAOGO *et al.*, 2001; McNAIR BOSTICK *et al.*, 2007).

Toutefois, pour RHOADES (*op. cit.*), l'amélioration des rendements agricoles obtenus à partir de ces pratiques associées à l'agroforesterie serait aussi le résultat des effets combinés de l'arbre sur le sol et le microclimat.

L'objectif visé dans ce chapitre est de caractériser le microclimat dans les parcs et d'évaluer l'impact de la fertilisation organique et minérale en présence des ligneux sur le comportement d'une culture de maïs en mesurant *in situ* la pluviométrie, la température, le rayonnement, la demande évaporative, l'humidité du sol, la nutrition minérale, la croissance et la productivité du maïs.

1. Matériel et Méthodes

1.1. Dispositif expérimental

Le dispositif de cette étude est le même que celui décrit dans le chapitre précédent. Le traitement (f) qui consiste à apporter des feuilles fraîches de karité équivalent à 40 kg/ha d'azote minéral dans le parc à *Faidherbia* n'a pas été pris en compte dans l'analyse des données. Les traitements de fertilisation assignés aux parcelles élémentaires (figure 18) de dimension 4m x 6m, ont été les suivants : (a) témoin sans apport d'azote, (b) apport d'urée équivalent à 80 kg/ha d'azote minéral, (c) apport de compost équivalent à 80 kg/ha d'azote minéral et (d) apport combiné du compost et de l'urée dosant chacun 40 kg/ha d'azote minéral.

Les traitements ont également reçu un supplément en phosphore (P) et en potassium (K) à la dose respective de 50 kg/ha du Superphosphate Triple (TSP; 46 % P_2O_5) et 40 kg/ha du chlorure de potassium (KCl ; 60 % K_2O). Le nombre de parcelles élémentaires était de 64 au total dont 32 dans le parc à *Faidherbia* et 32 dans le parc à karité. Les traitements ont été appliqués au cours des saisons culturales 2004, 2005 et 2006.

a) Matériel

Le matériel végétal est composé des pieds de *Faidherbia* et de karité et d'une variété de maïs de cycle moyen (95-110 jours), appelée SR 21 (Streak Resistant n° 21). C'est une variété composite qui est beaucoup exploitée dans l'Ouest du Burkina à cause de son potentiel de rendement très élevé (annexe 1)

1.2. Mise en place de la culture

Les travaux de terrain consistent à réaliser un labour des champs au tracteur dès le début du mois de juin de chaque année, période au cours de laquelle les pluies sont assez fréquentes. L'apport et l'enfouissement du compost sont effectués manuellement au moment de la préparation du sol.

Après avoir délimité les parcelles pour tous les traitements dans les deux parcs, celles-ci sont ensemencées à la dabac avec la variété de maïs vers fin juin début juillet de chaque année, à des écartements de 0,40 m entre les poquets et 0,80 m entre les lignes. Le semis est suivi, en moins de quinze jours après la levée, d'un démariage à 2 ou 3 plants par poquet.

Deux sarclages manuels sont effectués, le premier intervenant au moment du démariage et le second 15 jours plus tard. Au cours du premier sarclage, le phosphore et le potassium sont épandus le long de la ligne de semis.

Une première fraction de 1/3 de la quantité de l'urée est également épandue lors de ce premier sarclage et la deuxième fraction de 2/3 est appliquée au moment de la floraison du maïs. La récolte du maïs intervient entre les mois d'octobre et novembre de chaque année.

1.3. Collecte des données climatiques

La station synoptique à données complètes la plus proche de la zone d'étude est celle de Boromo (11° 40' N, 2° 55' O). Les données sur le climat de cette station pour la période 1985-2000 ont été analysées pour servir de référence. Ces données concernent la pluviométrie, les températures maximales et minimales, l'humidité relative de l'air et l'évaporation.

Au cours de l'expérimentation, les paramètres climatiques de la zone d'étude ont été mesurés à l'aide d'une station météorologique automatique (figure 19), montée à proximité du parc à *Faidherbia* et qui permet de rendre compte du microclimat à l'échelle du peuplement arboré.

La station est munie de capteurs connectés à une centrale d'acquisition automatique, la CR10X-2M (Campbell Scientific, Logan, Utah, USA). La centrale, à l'aide d'un programme

(annexe 3), effectue une lecture toutes les minutes et enregistre la moyenne de 30 lectures par demi-heure.

La température et l'humidité de l'air ont été mesurées à l'aide de deux sondes, la MP100 thermique et la Rotronic Hygroclip S3 (Campbell Scientific, Logan, Utah, USA) placées dans un dispositif à ventilation naturelle et protégé contre les rayons solaires.

Le rayonnement photosynthétiquement actif (PAR) a été enregistré à l'aide d'un capteur Quantum (modèle LI-190SZ, LI-COR, Lincoln, Nebraska, USA). Les valeurs du PAR, exprimées en micromole par mètre carré par seconde ($\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$), sont basées sur le fait que l'efficacité photosynthétique des végétaux verts est proportionnelle au nombre de photons absorbés dans les longueurs d'onde comprises entre 400 et 700 nm, et non pas à l'énergie reçue (UDO et ARO, 1999).

Les précipitations ont été mesurées avec un pluviomètre enregistreur (modèle ARG 100, Campbell, UK). La vitesse du vent a été mesurée par un anémomètre (Young modèle, Michigan, USA) placé à 2,30 m au dessus du sol.

1.4. Evapotranspiration

L'évapotranspiration est une des composantes fondamentales du cycle hydrologique et la précision de son estimation est essentielle pour le calcul du bilan d'eau, de l'irrigation et de la gestion des ressources en eau.

On appelle « évapotranspiration » la quantité d'eau qui est soustraite du sol par simple évaporation, ainsi que par la transpiration des végétaux. L'évapotranspiration comme l'évaporation est consommatrice d'énergie et consiste en un passage de l'eau de la phase liquide à la phase gazeuse.

L'évapotranspiration potentielle de référence (ET_0) représente la valeur maximale possible de l'évapotranspiration en absence d'advection, lorsque les surfaces du sol et des plantes sont couvertes d'eau libre et que, le sol étant nu ou la végétation étant rase, les résistances de l'espace poreux végétal sont nulles ou très faibles (SANON, 1999).

Elle correspond à la quantité d'eau qui serait évaporée si toute l'énergie solaire disponible était utilisée à cela. Dans la pratique elle est considérée comme une référence et peut être utilisée pour caractériser le climat à l'échelle régionale. L' ET_0 dépend uniquement des facteurs climatiques, le rayonnement global, le vent, l'humidité et la température de l'air.

Le rayonnement solaire constitue la principale source d'énergie capable de transformer l'eau sous forme de vapeur. Le rayonnement solaire incident qui atteint directement l'atmosphère et la surface terrestre est en grande partie absorbée et, pour une part assez faible,

The map illustrates the study area, showing the location of 12 plots (as, bs, ch, cs, dh, ds) in the RII and RI zones. A compass rose indicates North (N), South (S), East (E), and West (W). The Vers Boni river flows diagonally across the map. The RII zone is located north of the river, and the RI zone is located south of the river. The plots are labeled as follows: as RII, bs RII, ch RII, cs RII, dh RII, ds RII, as RI, bs RI, ch RI, cs RI, dh RI, and ds RI. The plots are represented by a tree icon with a shaded base and a label indicating the plot name and zone. The river is represented by a wavy line. The compass rose is located in the top left corner.

La chaleur sensible de l'air ambiant transfère de l'énergie aux cultures et exerce ainsi une forte influence sur le taux de la transpiration. Ce taux augmente avec la température

jusqu'à un certain seuil au-delà duquel il est limité par les cultures. Pendant que l'énergie provenant du rayonnement solaire et de l'air ambiant constitue la principale source de vaporisation de l'eau, la différence entre la pression de vapeur d'eau de la surface évaporative et de l'air ambiant ou encore gradient de pression de vapeur constitue le facteur clé du transfert de la vapeur. Le mouvement de la vapeur d'eau dépend de l'importance de la vitesse du vent et de la turbulence qui assure le renouvellement de l'air de la surface évaporative.

Quand l'eau s'évapore, l'air au-dessus de la surface évaporative devient graduellement saturé de vapeur d'eau et si cet air n'est pas continuellement remplacé par de l'air sec, le gradient de vapeur d'eau ainsi que les taux de l'évapotranspiration diminuent. Il faut souligner que l'air sec (faible taux d'humidité) exerce une forte succion sur l'eau. Ainsi, un air modérément sec accentue la transpiration, tandis qu'un air trop sec la diminue.

La méthode utilisée dans ce travail pour estimer ET_0 à l'échelle de l'heure est celle du bilan d'énergie calculé à partir de la formule de FAO Penman-Monteith (FAO PM) proposée par ALLEN *et al.* (2006):

$$ET_0 = \frac{0.408\Delta(R_n - G) + \gamma \frac{C_n}{T_h + 273.16} u_2 (e_s - e_a)}{\Delta + \gamma(1 + C_d u_2)} \quad (13)$$

où ET_0 (mm/h) est l'évapotranspiration de référence ; R_n ($\text{MJ m}^{-2} \text{h}^{-1}$) est le rayonnement net à la surface de la culture, obtenu par différence entre le rayonnement intercepté R_{ns} et le rayonnement émis R_{nl} : $R_n = R_{ns} - R_{nl}$, $R_{ns} = (1 - \alpha)R_s$ avec R_s ($\text{MJ m}^{-2} \text{h}^{-1}$) le rayonnement solaire global et α , l'albedo = 0,23

$R_{nl} = (1,35 R_s / R_{so} - 0,35) \times (0,34 - 0,14 \sqrt{e_a}) \times \sigma \times (T_{moy} + 273,3)^4$ avec R_{so} ($\text{MJ m}^{-2} \text{h}^{-1}$) le rayonnement solaire de courtes longueurs d'onde à ciel clair, $\sigma = 4,90 \cdot 10^{-9}$ ($\text{MJ/m}^2 \text{K}^4 \text{jour}$) la constante de Stefan-Boltzmann, T_{moy} ($^{\circ}\text{C}$) est la température moyenne de l'air;

G ($\text{MJ m}^{-2} \text{h}^{-1}$) est la densité de flux de chaleur sensible à la surface du sol, si $R_n > 0 \Rightarrow G = 0,1 R_n$; $R_n \leq 0 \Rightarrow G = 0,5 R_n$;

u_2 (ms^{-1}) est la vitesse du vent estimée à 2 m au-dessus du sol. Cette estimation est faite à partir de la formule proposée par ALLEN *et al.* (1998) :

$u_2 = u_z \frac{4,87}{\ln(67,8z - 5,42)}$ avec u_z (m s^{-1}) la vitesse du vent mesurée à la hauteur z (m) au-dessus du sol ; $e_s - e_a$ (kPa) est le déficit de pression de vapeur ; e_s (kPa) est la tension de vapeur saturante à la température de l'air avec $e_s = 0.6108 \exp(17,27T_h / 237,3 + T_h)$; e_a (kPa)

est la tension de vapeur réelle de l'air $e_a = e_s HR_h / 100$ avec HR_h (humidité de l'air en %); T_h (°C) est la température de l'air à une heure donnée; Δ (kPa °C⁻¹) est la pente de la courbe de la tension de vapeur saturante en fonction de la température de l'air avec

$$\Delta = 4099 e_s / (T_h + 237,3)^2 ; \gamma \text{ (kPa °C}^{-1}\text{) est la constante psychrométrique avec}$$

$$\gamma = 0,0673 \times [(293 - 0,0065Z) / 293]^{5,26}$$

Z (m) est l'altitude du lieu ; C_n (K mm s³ mg⁻¹ h⁻¹) et C_d (s m⁻¹) sont des constantes si $R_n > 0 \Rightarrow C_d = 0,24$ $R_n \leq 0 \Rightarrow C_d = 0,96$ et $C_n = 37$

Pour l'exécution pratique des calculs, certaines grandeurs définies ci-dessus sont considérées constantes (ALLEN *et al.*, 2006) et les autres ont été calculées sur la base des données météorologiques collectées.

La radiation solaire directe R_s a été estimée en appliquant la relation $R_s = \chi^s PAR^Q$ (ROSS et SULEV, 2000; MÖTTUS *et al.*, 2001).

Le ratio χ^s de 1,758 $\mu\text{mol W}^{-1} \text{s}^{-1}$ proposé par ROSS et SULEV (2000) a été utilisé, dans la mesure où nous n'avons pas pu mesurer simultanément le PAR^Q et la radiation solaire directe R_s (UDO et ARO, 1999; ALLEN *et al.*, 2006) au cours de l'expérimentation.



Figure 19. Station météorologique automatique du site d'étude de Dossi, Burkina Faso.

1.5. Humidité du sol

Le sol joue le rôle de réservoir régulateur des pluies. L'alimentation des plantes en eau sera d'autant mieux assurée que ce réservoir sera plus important. Le suivi de l'humidité du sol au cours de la saison pluvieuse a été effectué à l'aide des capteurs CS616 (Campbell Scientific, Ltd, UK) appelées réflectomètres de teneur en eau (figure 20). Le capteur est composé de deux tiges en acier longues de 30 cm connectées à un circuit imprimé. Un câble blindé à 4 fils est connecté à ce circuit et permet d'alimenter le capteur en électricité, de commuter l'alimentation et de mesurer le signal en sortie. Le circuit imprimé est enrobé dans un bloc d'époxy (figure 20). Les capteurs ont été installés verticalement dans les parcs à *Faidherbia* et à karité pour mesurer la teneur en eau dans les 30 premiers centimètres du sol.

La teneur en eau du sol est déterminée grâce à la sensibilité du capteur, vis-à-vis de la conductivité électrique apparente du sol entourant les tiges. La conductivité du sol dépend de celle de chacun de ses constituants qui sont l'eau, l'air et les particules solides.

TODOROFF et LANGELLIER (1998) ont rapporté qu'à une température de 20 °C du sol, la conductivité apparente est de 80 pour l'eau, 1 pour l'air et 5 pour les particules solides. Ces auteurs ont également souligné que compte tenu de la valeur très élevée de la conductivité de l'eau, la conductivité globale du sol serait par conséquent très étroitement liée à sa teneur en eau.

La méthode utilisée par le capteur CS616 pour mesurer la teneur en eau du sol est celle d'une mesure indirecte qui dépend de la conductivité électrique du matériau entourant les tiges. Les impulsions électromagnétiques générées par le circuit de la CS616, se propagent le long de la ligne de transmission (les tiges du capteur), à une vitesse dépendant de la conductivité électrique apparente du matériau entourant les tiges. Quand la conductivité augmente, la vitesse de propagation des impulsions diminue.

Le temps de trajet du signal appliqué détermine la fréquence ou la période de sortie de la CS616. La fréquence des impulsions envoyées, est surveillée par un circuit de mise à l'échelle, qui réduit la fréquence de façon à ce qu'elle soit lisible par la centrale de mesure (modèle CR10X-2M, Campbell Scientific, Logan, Utah, USA).

La période ou la fréquence en sortie du capteur est reliée de façon empirique, à la teneur en eau grâce à une équation de calibration de type quadratique (CAMPBELL SCIENTIFIC INC, 2002): $TVE = -0,0663 - 0,0063 \tau + 0,0007 \tau^2$ avec TVE ($m^3 m^{-3}$), la Teneur Volumique en Eau et τ en microsecondes (μsec), la période de la CS616.

La centrale de mesure est programmée de façon à lire les périodes de la CS616, en utilisant l'instruction 138 de la CS616 (annexe 4), à convertir celles-ci en teneur en eau en utilisant l'équation ci-dessus et à sauvegarder le résultat en mémoire finale.

L'utilisation de l'équation quadratique de calibrage standard permet d'atteindre une précision des mesures de $\pm 2,5$ % de teneur volumique en eau (TVE). Pour des sols ayant des propriétés diélectriques différentes, un écart des mesures peut se dégager mais il est souvent considéré comme une constante offset. L'offset est utilisé dans l'instruction 138 pour effectuer une mise à l'échelle, ou pour convertir une valeur à une grandeur physique différente (CAMPBELL SCIENTIFIC INC, 2002).

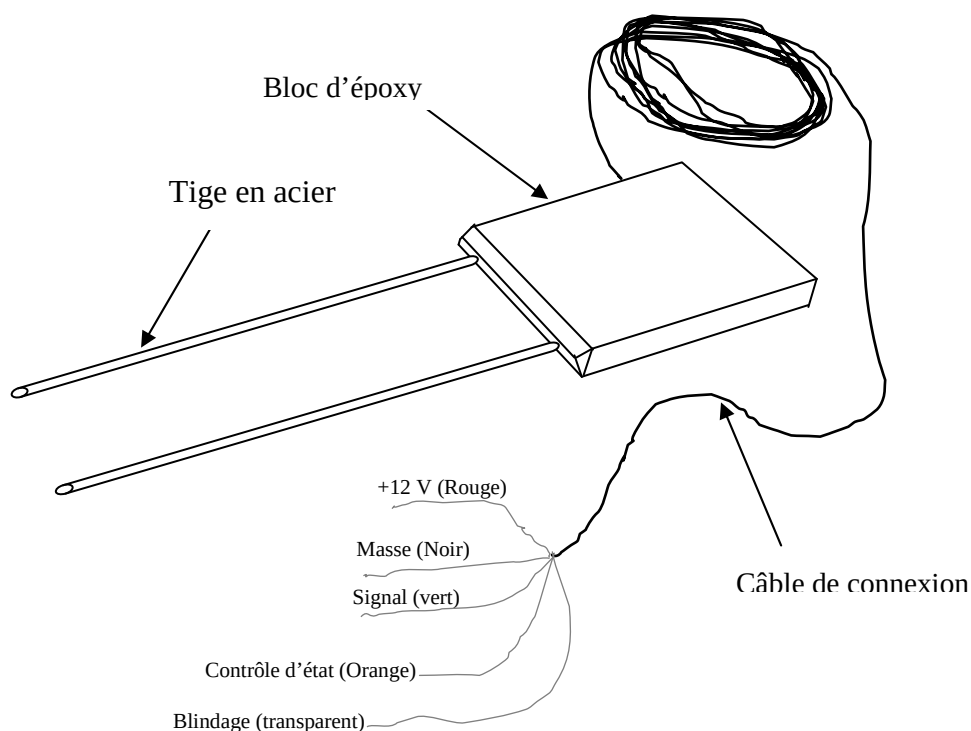


Figure 20. Réflectomètre de teneur en eau CS616

La précision et la stabilité des résultats des capteurs peuvent être affectées par la température du sol, la conductivité électrique de la solution du sol, la matière organique, la teneur en argile et la densité apparente. Lorsque les valeurs de conductivité de la solution excèdent 2 decisiemen par mètre (dSm^{-1}), la réponse du signal en sortie du capteur commence à changer et devient par la suite instable au delà de 5 dSm^{-1} . La matière organique et la plupart des argiles sont des constituants solides fortement polarisés. Ils agissent sur les molécules

d'eau et inhibent la polarisation de celles-ci par l'énergie électromagnétique introduite par le capteur. La réponse du capteur vis-à-vis de la teneur en eau devient instable.

L'instabilité de la réponse s'observe également lorsque la densité apparente des sols excède $1,5 \text{ g cm}^{-3}$ (CAMPBELL SCIENTIFIC INC, 2002).

1.6. Croissance des plants du maïs

1.6.1. La hauteur des plants

La hauteur des plants a été mesurée à l'aide d'une règle graduée au millimètre en prenant la distance entre le pied d'ancrage (au niveau du sol) et le sommet d'apparition des dernières feuilles pour la phase végétative, et l'extrémité de la panicule après la floraison.

Les mesures de la hauteur des plants ont été effectuées au moment de la floraison femelle sur 5 pieds de maïs pris au hasard dans chaque traitement du dispositif.

1.6.2. L'indice de surface foliaire

La production de la matière sèche par les plantes résulte de l'interception par les feuilles du rayonnement solaire actif pour la photosynthèse. Une grande partie de la transpiration et la collecte du carbone par les plantes sont assurées par les feuilles.

La surface foliaire a été déterminée au moment de l'initiation de la panicule du maïs qui marque la fin de la croissance foliaire et le début de la floraison femelle. Un cadre métallique de 1 m^2 de surface a servi pour délimiter les placettes de mesure dans chaque traitement. Dans chaque placette la longueur (L , m) et la largeur maximale (l_{max} , m) des feuilles sont mesurées.

La surface foliaire (SF , m^2) du total des plants contenus dans la placette est calculée à partir de la formule proposée par LIZASO *et al.* (2003) : $SF = 0,765 \sum_{i=1}^n (L_i \times l_{\text{max}_i})$ où n est le nombre total des feuilles par placette. L'indice foliaire (IF , m^2/m^2) est obtenu en divisant la surface foliaire (SF , m^2) par la surface de la placette (1m^2).

1.7. Nutrition minérale du maïs

Des échantillons des grains et des tiges de maïs ont été prélevés à la fin de l'expérimentation pour déterminer les exportations minérales par le maïs. Ces exportations concernent le phosphore et l'azote. L'azote (N) total a été déterminé par digestion selon la méthode Kjeldahl : digestion des sols à 420°C en présence d'acide sulfurique et d'un

catalyseur, suivie d'une distillation et d'un titrage de l'azote. Le phosphore (P) total a été déterminé par la méthode Bray II par colorimétrie.

1.8. Productivité

A la fin du cycle du maïs, la parcelle élémentaire de 6 m x 4 m est récoltée et les variables, tels que le poids des tiges, le nombre d'épis, le taux de remplissage des épis et le poids des grains, sont mesurées. Les tiges et les épis ont été séchés au soleil à la température ambiante.

Le taux de remplissage des épis a été réalisé sur un échantillon de dix épis de chaque traitement. Sur chaque épi, on a effectué un comptage du nombre de rang et sur chaque rang, le nombre de grains. Le taux de remplissage est obtenu en faisant le rapport entre le nombre moyen de grains par épi de l'échantillon et le nombre de grains de l'épi de référence de la variété de maïs utilisée (annexe 1). A l'issue de cette évaluation, tous les épis ont été égrenés et les grains recueillis ont été pesés.

2. Résultats et Discussion

2.1. Climat

2.1.1. La pluviométrie

La pluviométrie annuelle au cours des trois années d'expérimentation a été caractérisée par des variations inter-annuelles. En 2004, 2005 et 2006, le site expérimental de Dossi a enregistré respectivement 610 mm en 60 jours, 878 mm en 76 jours et 986 mm en 70 jours (figure 21). Comparativement à la pluviométrie moyenne annuelle de 948,4 mm pour la période 1950-1984 (SIVAKUMAR et GNOUMOU, 1987), celle de la période de référence (1985-2000) dont la moyenne est de 890 mm, enregistre un déficit d'au moins 54 mm.

Par rapport à cette période (1985-2000), la pluviométrie annuelle a diminué de 280 mm en 2004 et de 12 mm en 2005 avant d'enregistrer un excédant de 96 mm en 2006. Compte tenu de l'importance du déficit en 2004, la distribution des précipitations dans le temps a varié considérablement au cours de la période de végétation du maïs.

Les pluies ont été abondantes aux mois de juillet et août, favorisant ainsi la phase végétative et de reproduction du maïs, et par la suite, elles ont été sporadiques et insuffisantes pendant la phase de maturation intervenue aux mois de septembre et octobre (figure 21). Ces effets de la sécheresse sur la physiologie du maïs ont des répercussions sur le rendement final de la culture dont les pertes annuelles sont évaluées à 17% (EDMEADES *et al.*, 1995).

Au cours des saisons 2005 et 2006, la distribution des pluies a été similaire à celle de la période de référence (1985-2000). Elle est de nature unimodale (SIVAKUMAR et GNOUMOU, 1987). Les pluies présentent un maximum en août qui peut être décalé en septembre et rarement en juillet. Ce décalage en septembre est plutôt favorable à des variétés de maïs de cycle intermédiaire (< 130 jours) qui peuvent boucler leur cycle dans des conditions hydriques assez favorables, malgré les semis tardifs. En effet, dans cette localité située dans la zone cotonnière du pays, la période des semis du coton précède généralement celle des céréales (DEPOMMIER, 1996) et dans le calendrier agricole, le maïs est généralement semé entre début juin et fin juillet selon la précocité des variétés et les conditions pluviométriques.

2.1.2. La température de l'air

Les températures maximales de l'air au cours des trois saisons ont été comparables à celles de la période de référence (1985-2000). Les minima ont été par contre plus élevés que ceux de la période 1985-2000. Une comparaison des moyennes des minima des deux périodes par le Test t de Student indique que cette différence a été statistiquement significative seulement en 2004 ($P = 0,01$) et en 2005 ($P = 0,048$).

De part l'allure des courbes de la figure 21, on constate que la température de l'air augmente régulièrement depuis le mois de janvier pour atteindre un maximum en avril avant de décroître en mai avec l'arrivée de la mousson. La différence de 2 à 3 °C des températures minimales de l'air entre les deux périodes pourrait être attribuée à l'effet du parc.

En effet, MONTEITH *et al.* (1991) ont montré que l'air confiné sous les abris des arbres pourrait être légèrement plus chaud à cause du déficit de pression de vapeur d'eau dont les valeurs dans ces conditions demeurent plus ou moins élevées que celles du terrain ouvert.

Ces auteurs ont également conclu que grâce au brassage agité de l'air, les écarts de température ainsi que le déficit de pression de vapeur d'eau de l'air entre les deux zones s'amenuisent.

2.1.3. L'évapotranspiration potentielle

L'évapotranspiration potentielle (ETP) moyenne, évaluée par mois pendant ces deux périodes, a également évolué de la même façon que la température de l'air (figure 22). Les plus faibles valeurs de l'évapotranspiration sont observées pendant la saison des pluies à cause de la diminution des températures et du déficit de pression de vapeur d'eau de l'air (BREMAN et KESSLER, 1995). Les valeurs moyennes de l'ETP, au cours des saisons 2004,

2005 et 2006, ont diminué de 7 % comparativement à celles de la période de référence (1985-2000). La différence n'est toutefois pas significative au seuil de 5 % par le Test t de Student.

Par ailleurs, la figure 24 indique que l'ETP de la période de référence, calculée à partir du rayonnement solaire global de courtes longueurs d'ondes, demeure fortement corrélée ($r^2 = 83\%$) à la moyenne de l'ETP de la période 2004-2006, calculée à partir du PAR.

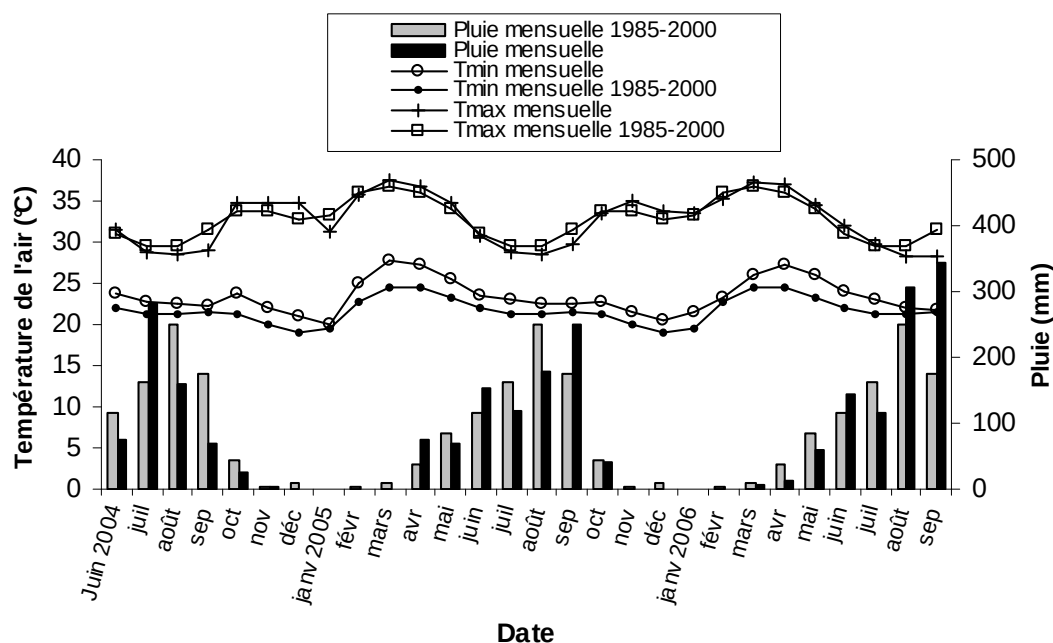


Figure 21. Températures moyennes mensuelles minimales et maximales de l'air, hauteur mensuelle des pluies en 2004, 2005 et 2006, et moyennes interannuelles de 1985 à 2000, Dossi, Burkina Faso.

La diminution de l'ETP pendant cette période est probablement due à la valeur du ratio χ^s utilisée pour convertir les unités du PAR^Q en unités énergétiques (Wm^{-2}). Comme le montre la figure 24, la valeur de ce ratio qui lie le PAR^Q (0,4-0,7 μm) et la radiation solaire R_s (0,285-2,8 μm) n'est pas constante tout au long de l'année. Elle varie selon la nébulosité et l'insolation journalière. La valeur moyenne de 1,9 EMJ^{-1} du ratio est commune pour la période allant de juin à août, période au cours de laquelle débute la mousson avec un temps très nébuleux.

A partir du mois de septembre où l'activité de la mousson diminue, la valeur du ratio augmente légèrement jusqu'en mai et atteint une moyenne de 2,12 EMJ^{-1} . La plus faible valeur du ratio (1,62 EMJ^{-1}) enregistrée au mois de février est relative à la période intense de

l'harmattan, période au cours de laquelle l'atmosphère est très brumeuse à cause de la poussière et des aérosols des feux de brousse (figure 25). Les suspensions poussiéreuses de l'harmattan sont connues ne pas avoir de longueur d'onde sélective d'atténuation du rayonnement solaire global (UDO et ARO, 1999).

La valeur du ratio au cours de l'année est en moyenne de 2,01 EMJ^{-1} mais selon ROSS et SULEV (2000), la conversion des valeurs du PAR exprimées en unités photobiologiques ($\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$) en unités énergétiques (Wm^{-2}) nécessite des précautions particulières à cause de la composition spectrale de la radiation mesurée. Ces auteurs ont rapporté que ce ratio serait en moyenne de 1,814 pour le rayonnement solaire global (G) ; 1,758 pour le rayonnement solaire direct (S) ; 2,127 pour le rayonnement diffus (D) et 0,462 pour le rayonnement réfléchi (R).

2.1.4. L'humidité relative de l'air

L'humidité relative de l'air a évolué de façon similaire d'une année à l'autre dans les localités de Dossi et de Boromo, mais les valeurs moyennes diffèrent beaucoup d'une localité, et d'une saison à l'autre. L'humidité relative de l'air enregistrée à Dossi a diminué de 20 % en 2005 et de 30 % en 2006 de novembre à avril, comparativement à celle de Boromo.

En revanche, elle a été plus élevée de 7 % que celle de Boromo au cours de la saison des pluies (figure 22). Des résultats similaires avaient été rapportés par SHANKARNARAYAN *et al.* (1989) cités par BREMAN et KESSLER (1995) dans les régions semi-arides de l'Inde. Ces modifications de l'humidité de l'air à Dossi sont liées à l'importance du déficit de saturation de la masse d'air à l'intérieur du parc et à la turbulence du vent qui conditionne les échanges énergétiques et le confinement de la masse d'air (BALDY et STIGTER, 1993). L'augmentation des pressions partielles de vapeur d'eau de l'air à Dossi n'a pas affecté la croissance des cultures ni occasionné des risques phytosanitaires.

2.1.5. Le vent

Les vents dominants, de secteur général Sud-Ouest (SW), soufflent depuis l'Océan Atlantique et apportent les pluies jusqu'aux côtes de l'Afrique de l'Ouest entre les mois de mai et octobre (UDO et ARO, 1999). Au cours de cette période, la vitesse des vents est très élevée dans les deux stations (figure 23). L'importance des vents a été plus manifeste à Dossi.

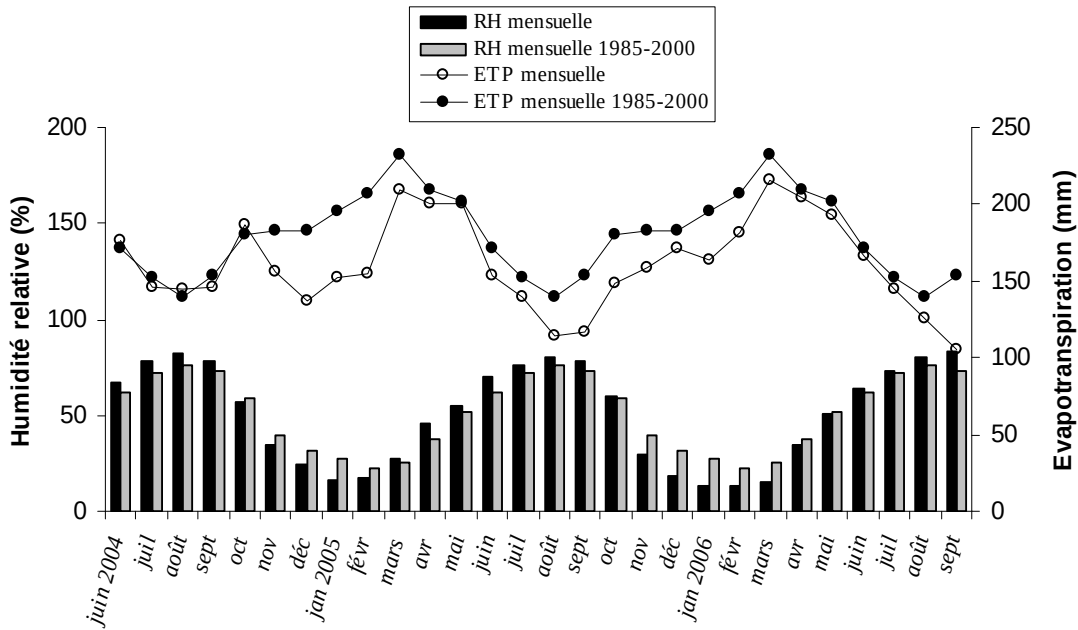


Figure 22. Valeurs moyennes mensuelles de l'ETP et de l'humidité relative de l'air des saisons 2004, 2005 et 2006 comparées à celles de la période 1985-2000 dans le village de Dossi, Burkina Faso.

La vitesse du vent au-dessus de 2 m du sol a été en moyenne de $1,54 \text{ ms}^{-1}$ à Dossi et de $0,95 \text{ ms}^{-1}$ dans la station synoptique de Boromo. La comparaison de ces moyennes par le Test t de Student indique que la différence est très significative au seuil de 1 %. Le vent moyen au-dessus de 10 m du sol, calculé sur la période 1985-2000, a été réduit de 20 % comparativement à celui de Dossi (figure 23).

Cette réduction qui ne semble pas justifier certains énoncés sur l'importance des vents en altitude (ALLEN *et al.*, 1998) serait peut être liée à l'appareillage ou à la situation topographique de cette station, et en particulier aux effets de masque. Des arbres hauts de 9 à 12 m situés à proximité du périmètre de la station pourraient éventuellement favoriser ces effets. L'augmentation de la vitesse des vents à Dossi, d'avril à octobre, s'explique en partie par les activités de la mousson (SOME, 1989) mais également par la phénologie inversée de *Faidherbia* dont la perte du feuillage pendant cette période ne permet pas à l'arbre de jouer véritablement le rôle de brise-vent. Ce rôle a cependant pu être constaté dans un parc à karité où la vitesse du vent sous les arbres avait été réduite de 50 % comparativement à un terrain ouvert dépourvu de ligneux (JONSSON *et al.*, 1999).

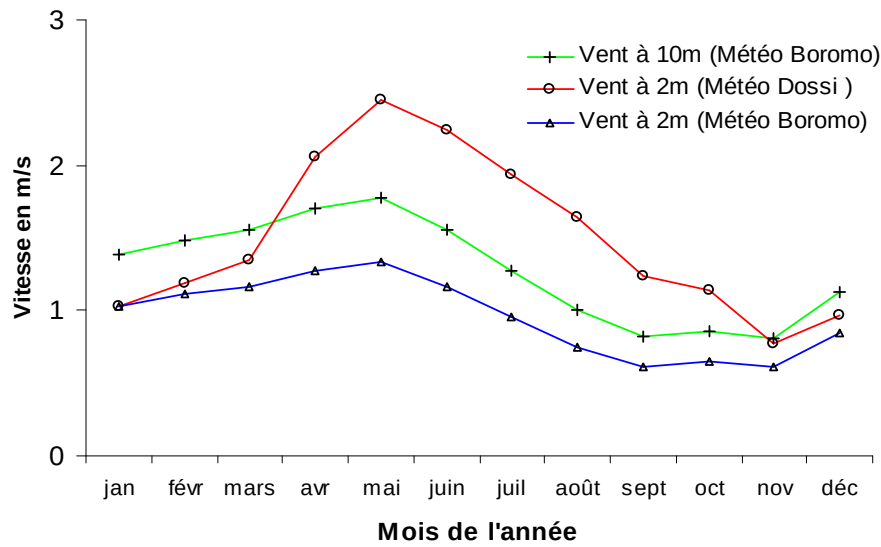


Figure 23. Comparaison des vitesses moyennes mensuelles des vents au-dessus de 10 m et 2 m du sol à Boromo et à Dossi, Burkina Faso.

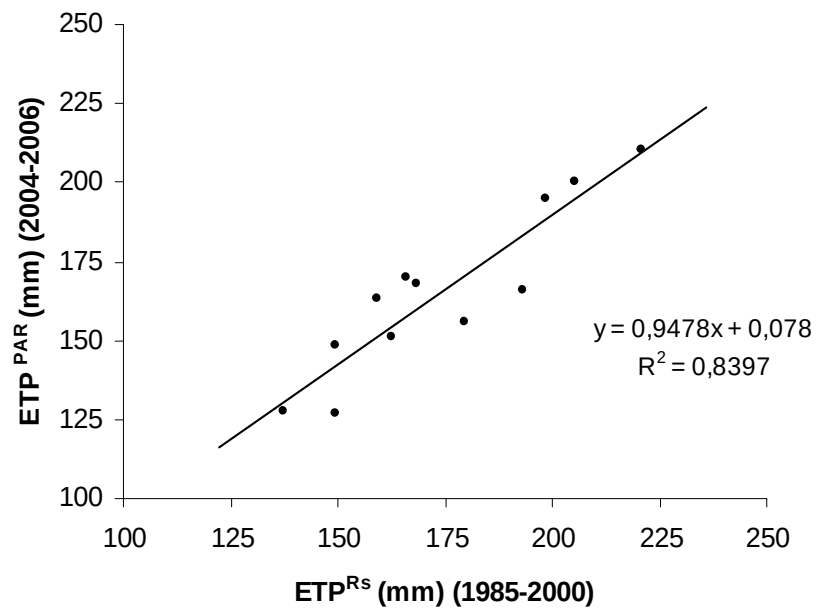


Figure 24. Relation entre l' ETP^{PAR} calculé à partir du rayonnement PAR^Q et l' ETP^{Rs} calculé à partir du rayonnement R_s .

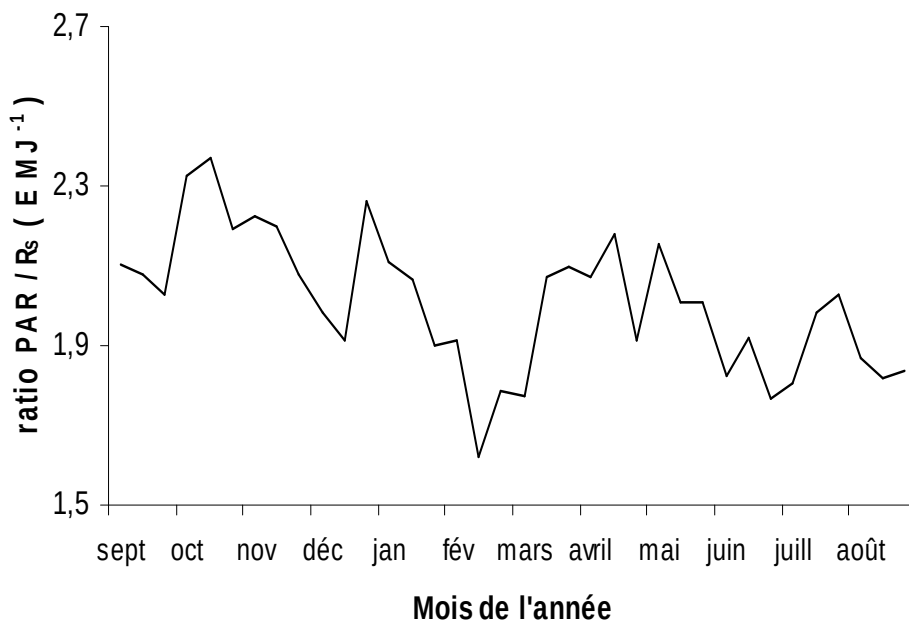


Figure 25. Evolution du Ratio décadaire entre le rayonnement PAR et le rayonnement solaire global (Rs) au cours d'une année à Dossi, Burkina Faso.

2.2. Humidité du sol

Les effets de l'arbre sur la disponibilité en eau du sol ont été traduits par l'évolution de la teneur en eau à 30 cm de profondeur évaluée à l'aide des réflectromètres.

L'eau stockée dans le sol du parc à *Faidherbia* au cours de la saison 2005 a été en moyenne de 115 mm sous le houppier et de 123 mm en dehors du houppier de l'arbre (figure 26a). Une comparaison par le test t de Student indique que la différence d'humidité du sol constatée entre les deux emplacements n'est pas significative au seuil de 5 %.

Dans le parc à karité, le stock d'eau du sol a été plus élevé sous le houppier qu'en dehors du houppier au début de la saison et par la suite, après les fortes précipitations des mois d'août et de septembre, il a demeuré plus élevé d'au moins 20 % en dehors du houppier de l'arbre (figure 26a). Contrairement à la situation de 2005, l'abondance et la bonne répartition des pluies en 2006 ont occasionné une amélioration de 20 à 40 % du stock d'eau du sol sous le houppier du karité par rapport à celui situé en dehors du houppier (figure 26b).

Dans le parc à *Faidherbia* cette amélioration a été de l'ordre de 17 % en dehors du houppier des arbres. L'évaporation de l'eau à partir de la surface du sol, la consommation en eau des cultures et des arbres et la redistribution des eaux de pluie dans le sol ont été des processus physiques primaires qui seraient à l'origine des variations de l'eau stockée dans le sol. L'épuisement progressif du stock d'eau dans le sol des deux parcs constaté aux mois de septembre et d'octobre de l'année 2005 (figure 26a) pourrait être attribué à la rareté des pluies et à la consommation d'eau du maïs au cours de sa période critique (floraison mâle et femelle) (PHIRI *et al.*, 2003). L'augmentation du stock d'eau sous le houppier du karité constatée en 2006 (figure 26b) s'explique en partie par l'amélioration des conditions physiques du sol due à la litière (YOUNG, 1995) et l'égouttage de la pluie interceptée par les organes aériens (BALDY et STIGTER, 1993; ZOMBOUDRE *et al.*, 2005a) mais également par l'effet d'ombrage qui contribue à réduire l'évaporation du sol et la transpiration des cultures sous-jacentes (JONSSON, 1995). Ce dernier cas de figure ne semble pas se vérifier sous le houppier de *Faidherbia*. En effet, de par sa phénologie inversée, le houppier de cette espèce n'intercepte que 20 % du rayonnement solaire incident et son impact sur la distribution des pluies et l'évaporation du sol peut s'avérer négligeable à cause de l'absence du feuillage pendant l'hivernage (MONTEITH *et al.*, 1991).

Au Malawi, ce phénomène avait été observé sous les houppiers de petits *Faidherbia*. Cependant, le niveau d'humidité des sols était de 4 à 53% supérieur sous les grands houppiers qu'en terrain découvert (RHOADES, 1997).

2.3. Croissance des plants du maïs

Les variables concernées par cette évaluation sont la hauteur des plants et l'indice foliaire. Les mesures ont été effectuées à la fin de l'initiation paniculaire du maïs et dans les traitements situés sous et hors houppier des arbres des deux types de parcs. Les hauteurs des plants à maturité dans le parc à *Faidherbia* sont relativement plus élevées sous le houppier qu'en dehors du houppier (figure 27). Cette différence a été très significative ($P = 0,001$) en 2004 et en 2006 (tableau IX). La figure 27 indique également que la hauteur des plants a été significativement différente entre les traitements de fertilisation aussi bien en 2004 qu'en 2005 et 2006. La hauteur du maïs, calculée sur les trois années, était en moyenne de 191 cm sous le houppier et de 172 cm en dehors du houppier de *Faidherbia*. Dans les traitements de fertilisation, elle était en moyenne de 158 cm pour le témoin, 199 cm pour l'urée + compost et de 186cm pour l'urée et le compost.

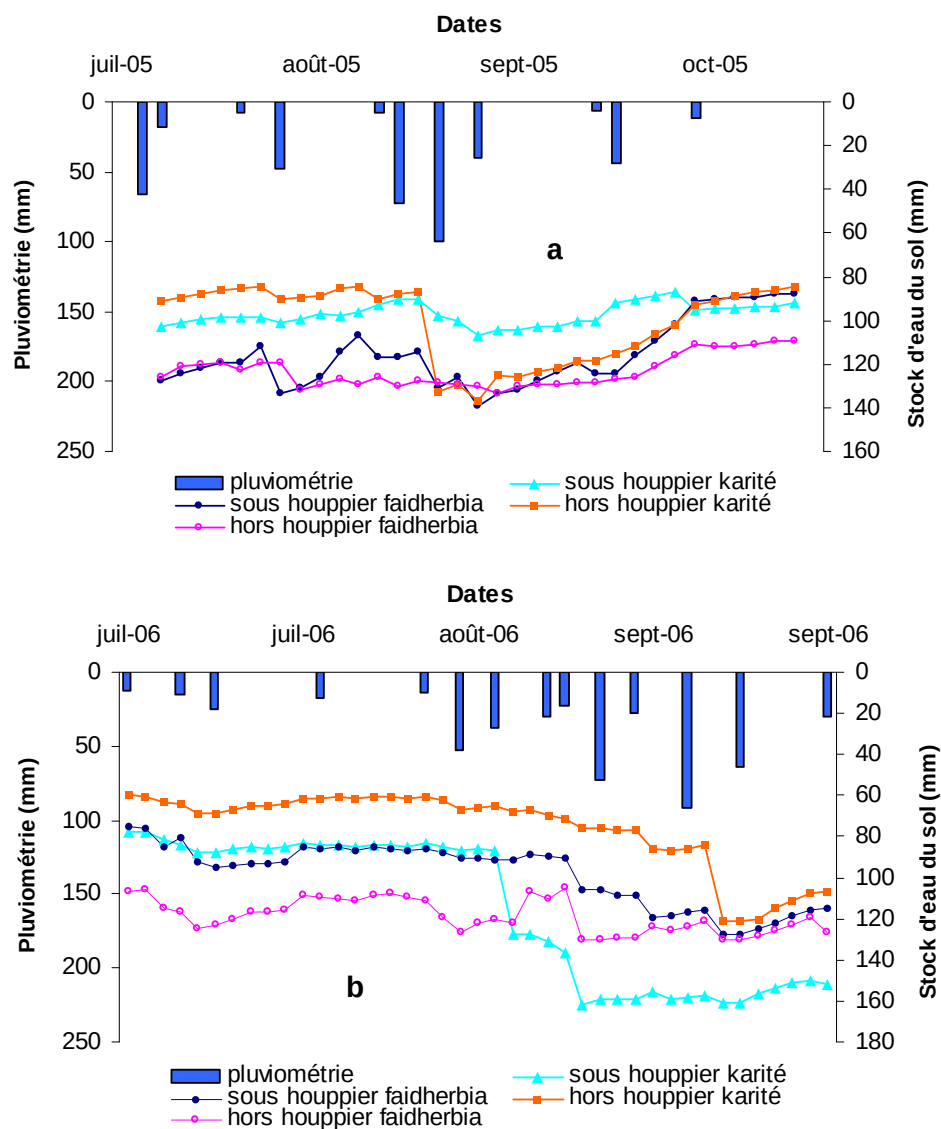


Figure 26. Evolution après chaque pluie du stock d'eau en dessous de 30 cm du sol, sous et hors houpier du karité et de *Faidherbia* associés au maïs, en 2005 (a) et 2006 (b), à Dossi, Burkina Faso.

L'amélioration de la croissance du maïs sous le houpier de *Faidherbia* serait en partie due à sa phénologie inversée. En effet, selon RHOADES (*op. cit.*), les branches défeuillées du *Faidherbia* pendant l'hivernage contribuent à améliorer la fertilité des sols par le recyclage de la litière et la disponibilité en eau en réduisant le déficit de pression de vapeur de l'air et l'évaporation du sol. Les remontées en surface par capillarité des eaux souterraines (BONELL, 1993) pourrait éventuellement améliorer l'humidité du sol sous les houppiers au cours des années sèches et favoriser ainsi la croissance des cultures.

Dans le parc à karité en revanche, l'accroissement des plants a été significativement plus élevé hors houppier que sous houppier (figure 28, tableau IX). Cet écart entre les deux milieux s'explique en partie par l'insuffisance de l'éclairement et la modération des températures sous l'effet ombrage (KESSLER, 1992; BREMAN et KESSLER, 1995; JONSSON, 1995).

Selon BONHOMME (1984), l'émission des feuilles de maïs est beaucoup influencée par la température de l'air et celle du sol. Dans un milieu où la température du sol est plus basse que celle de l'air, le rythme d'apparition des feuilles est très lent. Ce rythme serait à l'origine de la réduction de la hauteur des plants constatée sous le houppier.

Les traitements de fumure n'ont pas présenté de variation significative de la hauteur des plants au cours des trois saisons de mesure (tableau IX). La hauteur moyenne des plants mesurée sous et en dehors du houppier du karité a été respectivement de 150 et 170 cm.

Tableau IX. Valeurs de F et degré de signification de l'analyse de variance comparant la hauteur moyenne des plants de maïs dans les parcs à *Faidherbia* et à karité. Dossi, Burkina Faso, saisons des pluies 2004, 2005 et 2006. (n = 32)

Parc	Source de variation	ddl	2004	2005	2006
<i>F. albida</i>	Houppier	1	26,39 ^{**}	0,17 ^{ns}	21,56 ^{**}
	Fertilisation	3	4,05 [*]	7,83 [*]	13,27 ^{**}
	Interaction	3	0,45 ^{ns}	0,64 ^{ns}	10,76 [*]
	Variation résiduelle	24			
<i>V. paradoxa</i>	Houppier	1	0,06 ^{ns}	10,79 ^{**}	12,65 ^{**}
	Fertilisation	3	9,73 ^{**}	1,10 ^{ns}	2,99 ^{ns}
	Interaction	3	3,92 [*]	0,56 ^{ns}	0,11 ^{ns}
	Variation résiduelle	24			

^{ns} = non significatif au seuil de 5%

^{*} = significatif au seuil de 5% (p<0,05)

^{**} = significatif au seuil de 1% (p<0,01)

ddl = degré de liberté

n = nombre d'observations

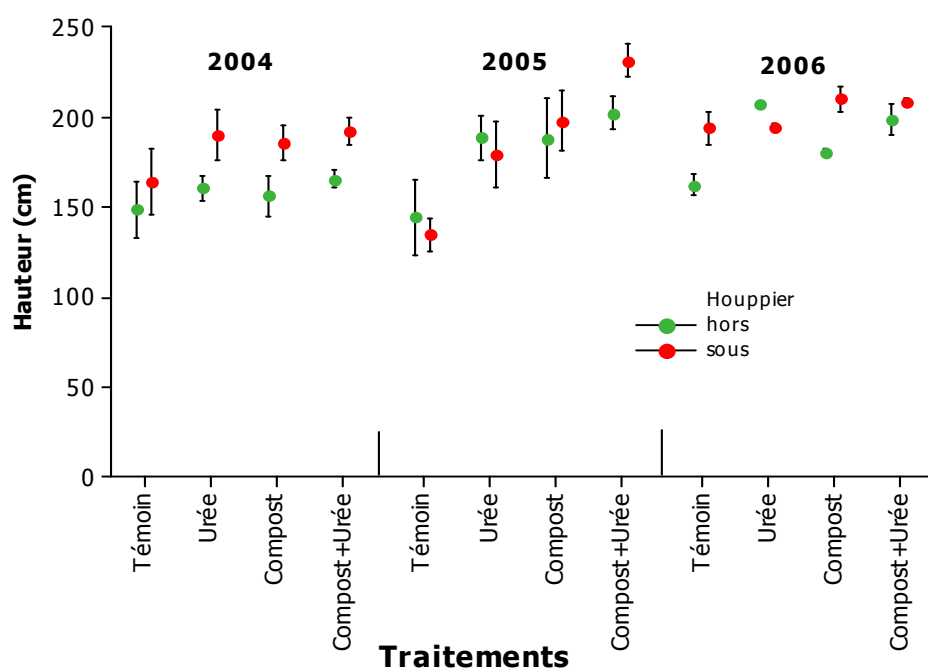


Figure 27. Hauteur moyenne (cm) des plants de maïs en fonction de la fumure appliquée sous et hors houppier des arbres dans le parc à *Faidherbia*. Dossi, Burkina Faso, saison des pluies 2004, 2005 et 2006.

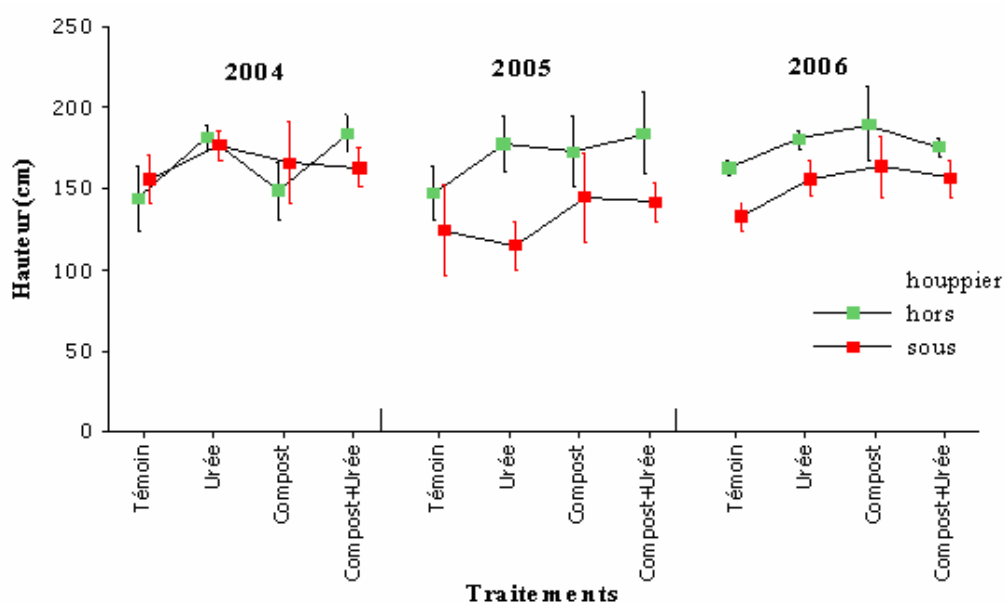


Figure 28. Hauteur moyenne (cm) des plants de maïs en fonction de la fumure appliquée sous et hors houppier des arbres dans le parc à karité. Dossi, Burkina Faso, saisons des pluies 2004, 2005 et 2006

L'indice foliaire évalué à la floraison du maïs sous et hors du houppier de *Faidherbia* ne présente aucune variation significative ($P = 0,641$) au cours des deux saisons des pluies

(figure 29). Par contre, entre les fumures, l'indice foliaire a varié très significativement ($P=0,009$). Il a été plus élevé avec l'apport de l'urée (4,37) et du compost (3,85) que le témoin (2,67). Dans le parc à karité, l'indice foliaire a été significativement ($P = 0,028$) plus élevé en dehors du houppier que sous le houppier (figure 30). Il a été en moyenne de 1,26 sous le houppier et 1,73 en dehors du houppier.

Ces résultats indiquent que l'ombre produite par les branches défeuillées du *Faidherbia* n'a aucune influence négative sur la croissance du maïs. L'expansion de la surface foliaire du maïs qui dépend des radiations solaires interceptées (POMMEL et BONHOMME, 1998) a été presque identique sous et hors du houppier de *Faidherbia*.

L'indice foliaire du maïs a été de 3,39 sous le houppier contre 3,78 en dehors du houppier. Selon WILSON *et al.* (1998), les plants de lumière qui reçoivent de passage de l'ombre au cours de leur croissance ont tendance à augmenter les dimensions de certains de leurs organes telles les tiges et les feuilles afin de capter le maximum des ressources, nécessaires pour la production. Ces auteurs rapportent également que malgré l'existence de ces mécanismes de croissance compensatoires chez les plantes en C4 entièrement à l'ombre, le rayonnement solaire incident à l'ombre serait minimal et ne permettrait pas une croissance végétative aussi égale à celle des plants sous soleil.

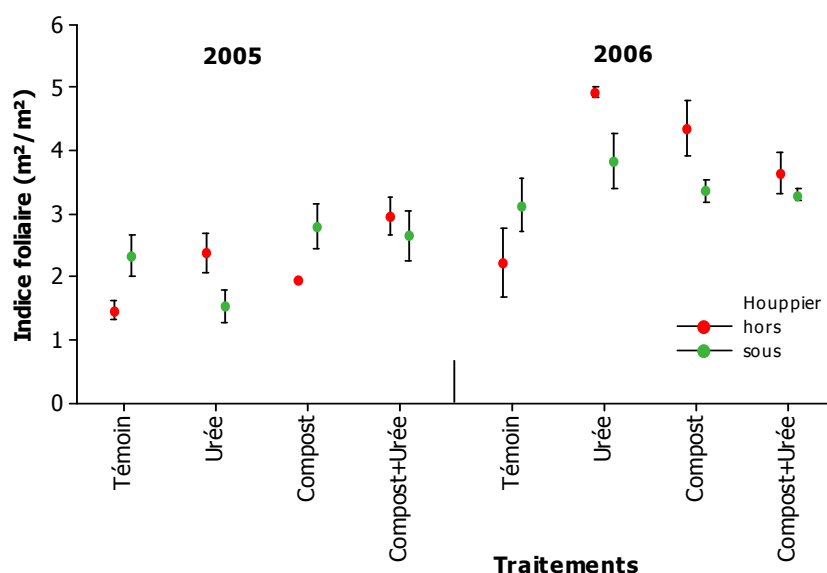


Figure 29. Valeurs moyennes de l'indice foliaire du maïs en fonction de la fumure appliquée sous et hors houppier des arbres dans le parc à *Faidherbia*. Dossi, Burkina Faso, saisons des pluies 2005 et 2006.

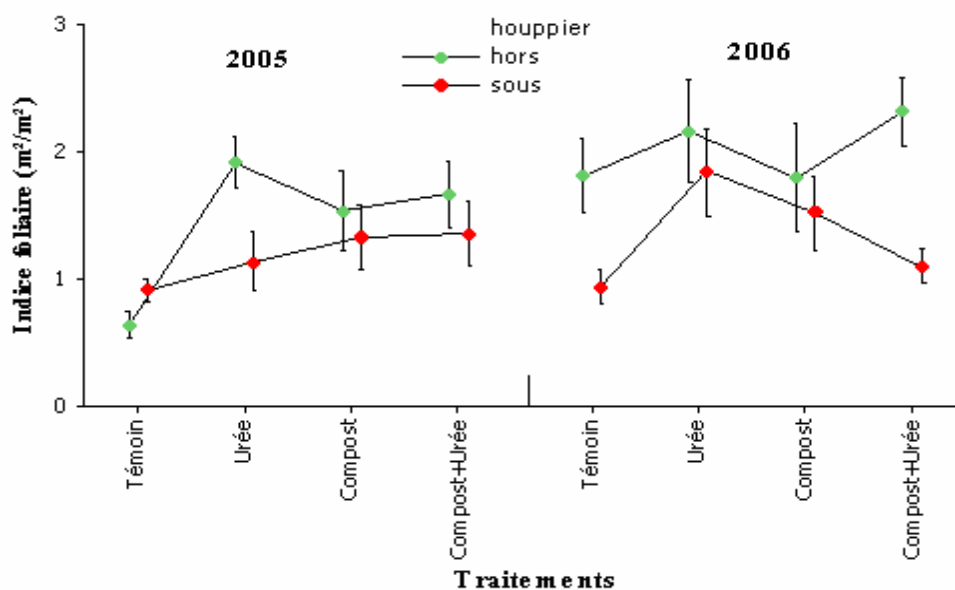


Figure 30. Valeurs moyennes de l'indice foliaire du maïs en fonction de la fumure appliquée sous et hors houppier des arbres dans le parc à karité. Dossi, Burkina Faso, saisons des pluies 2005 et 2006.

BOFFA *et al.* (2000) soulignent que le PAR obtenu dans une zone ensoleillée serait réduit de 40 % sous l'ombre du karité. Cette réduction assez importante du PAR expliquerait en partie la différence de l'indice foliaire mesuré sous et hors houppier du karité. La différence de l'indice foliaire entre les traitements de fumure peut être attribuée à l'amélioration de la nutrition phosphatée des plantes due à l'apport d'urée et du compost. Selon POMMEL et BONHOMME (1998), la nutrition phosphatée des plantes favorise plus l'expansion foliaire en longueur qu'en largeur.

2.4. Nutrition minérale du maïs

Dans le parc à *Faidherbia*, les exportations en azote par les grains et les tiges ont été plus élevées avec la fertilisation à l'urée que celle au compost seul et le témoin non fertilisé (figure 31). Ces exportations dans les parcelles fertilisées au compost et les parcelles témoin ont été par contre plus élevées sous le houppier qu'en dehors du houppier.

Dans les parcelles fertilisées à l'urée, l'exportation en azote est plus élevée en dehors du houppier que sous le houppier mais ne présente pas de différence significative (figure 31). Les mêmes tendances sont observées au niveau de l'exportation en phosphore. L'exportation

totale en azote par les grains et les tiges varie de 45 kg N ha⁻¹ dans les parcelles témoin à 131 kg N ha⁻¹ dans les parcelles fertilisées à l'urée.

La proportion la plus importante des exportations en azote et en phosphore est enregistrée au niveau des grains. Cette proportion en azote varie de 54 % avec l'urée à 65 % avec le compost + urée. La proportion en phosphore varie de 56 % avec l'urée à 74 % avec le compost seul.

Dans le parc à karité, les tendances des exportations en azote et en phosphore par les tiges et les grains de maïs avec les différentes fumures, ont été similaires à celles du parc à *Faidherbia*. Toutefois, dans les parcelles fumées, on relève une exportation en azote et en phosphore beaucoup plus élevée en dehors du houppier que sous le houppier (figure 32).

L'exportation totale en azote varie de 31 kg N ha⁻¹ dans la parcelle témoin à 103 kg N ha⁻¹ dans la parcelle fertilisée à l'urée. L'exportation totale en phosphore varie de 5 kg P ha⁻¹ dans la parcelle témoin non fertilisé à 19 kg P ha⁻¹ dans celle fertilisée avec le compost + urée.

Les proportions en azote et en phosphore exportées par les grains demeurent cependant plus élevées que celles des tiges aussi bien sous le houppier qu'en dehors du houppier des arbres.

L'analyse de ces résultats montre qu'en absence de fertilisation, la nutrition minérale du maïs dans le parc à *Faidherbia* est meilleure sous le houppier qu'en dehors du houppier.

Cette différence pourrait être due à la présence de l'arbre qui, selon RHOADES (1997), contribue à améliorer la fertilité des sols sous-jacentes. L'auteur souligne également que les espèces qui ont la capacité de fixer de l'azote tels que le *Faidherbia* et le *Sesbania* [*Sesbania sesban* (L.) Merr.], réduisent leur compétition pour l'azote avec les cultures et permettent d'accroître le capital du sol en azote (PHIRI *et al.*, 2003).

BELSKY *et al.* (1989), DEPOMMIER (1996) et TOMLINSON *et al.* (1998) ont rapporté également que la préférence de l'espèce par les oiseaux ou les animaux de pâturage pour l'ombre, les fruits et les feuilles, serait à l'origine d'une augmentation des dépôts de nutriments dans le sol sous forme de fumier. En apportant de l'urée ou du compost associé à l'urée dans les parcs à *Faidherbia* et à karité, on relève que l'exportation en azote et en phosphore par le maïs est relativement plus élevée en dehors du houppier que sous le houppier (figures 31 et 32).

L'amélioration de la nutrition minérale du maïs hors du houppier est probablement due à une disponibilité des éléments nutritifs qui serait moins accrue sous le houppier suite aux phénomènes d'immobilisation ou de volatilisation de l'azote liés à la présence des résidus organiques (SZOTT et KASS, 1993).

Les quantités moyennes d'azote et de potassium prélevées au sol par les tiges de maïs étaient respectivement de 40 kg ha⁻¹ et 7 kg ha⁻¹ dans le parc à *Faidherbia* et de 28 kg ha⁻¹ et 4 kg ha⁻¹ dans le parc à karité. Ces résultats qui corroborent ceux de SANCHEZ (1995) justifient la nécessité de restituer au sol les résidus de récolte dont le recyclage permet de recouvrer environ 38 % du phosphore et 54 % de l'azote exportés.

2.5. Productivité

Le rendement grain du maïs a été significativement plus élevé sous le houppier qu'en dehors du houppier de *Faidherbia* (tableau X, figure 33). Par contre, dans le parc à karité, le maïs a beaucoup plus produit en dehors du houppier que sous le houppier (tableau X, figure 34). Dans les deux parcs toutes les fumures ont présenté une variation significative du rendement grain, au cours des saisons 2005 et 2006 avec des seuils de signification de 5% et 1% (tableau X). Le témoin non fertilisé a enregistré le rendement grain le plus bas aussi bien sous le houppier qu'en dehors du houppier dans les deux parcs.

Le rendement grain du maïs, obtenu avec les traitements compost + urée et urée, a été en moyenne deux fois plus élevé que celui du témoin dans le parc à *Faidherbia* (3300 contre 1700 kg/ha). La même tendance est observée dans le parc à karité mais le rendement serait plutôt élevé dans le traitement compost + urée surtout en 2004, année de faible pluviométrie (610 mm) et dans le traitement urée au cours de l'année 2006 où les pluies ont été très abondantes (1016 mm).

Au cours des trois années d'expérimentation, les rendements du maïs dans les deux parcs ont été plus faibles en 2004 et plus élevés en 2005 et 2006. Sous le houppier de *Faidherbia*, le surplus du rendement grain a été de 130 % en 2004 et de 40 % en 2005 (figure 33). En revanche, sous le houppier du karité, une réduction significative de 20 % du rendement grain a été observée en 2004 contre 40 % en 2005 et 30 % en 2006 (figure 34).

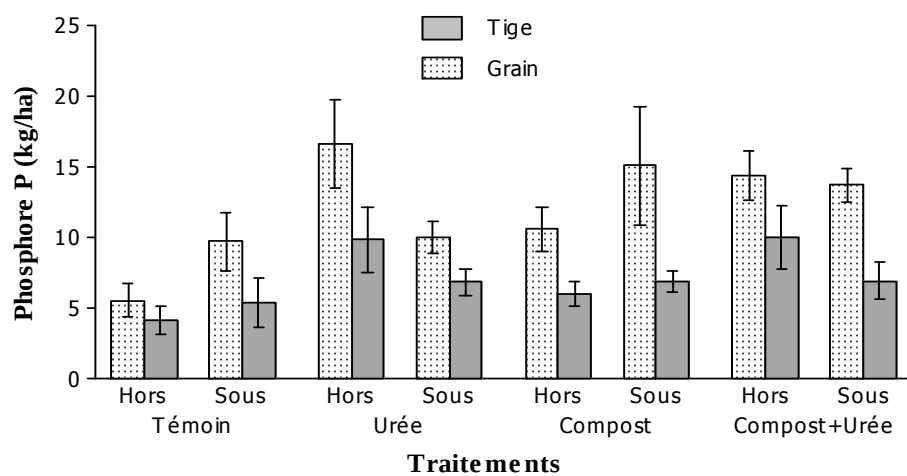
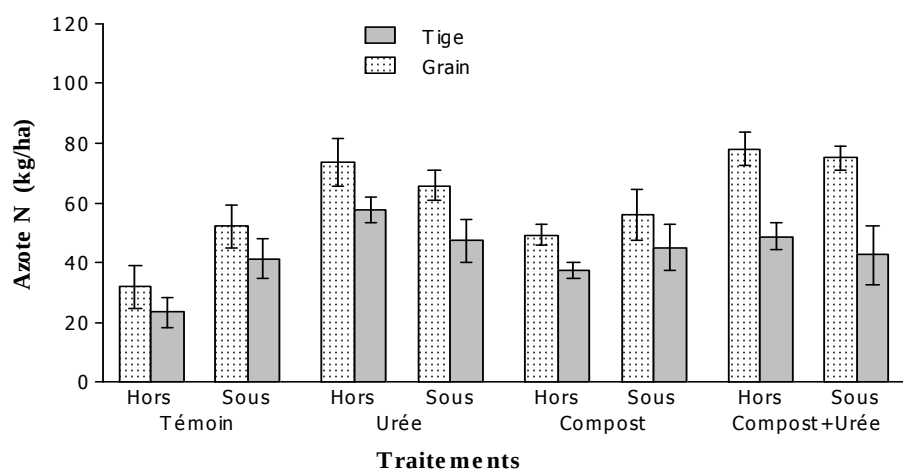


Figure 31. Azote total et phosphore total exportés par le maïs en fonction de la fumure appliquée sous et hors houppier des arbres dans le parc à *Faidherbia*. Dossi, Burkina Faso, saison des pluies 2006. (n = 4)

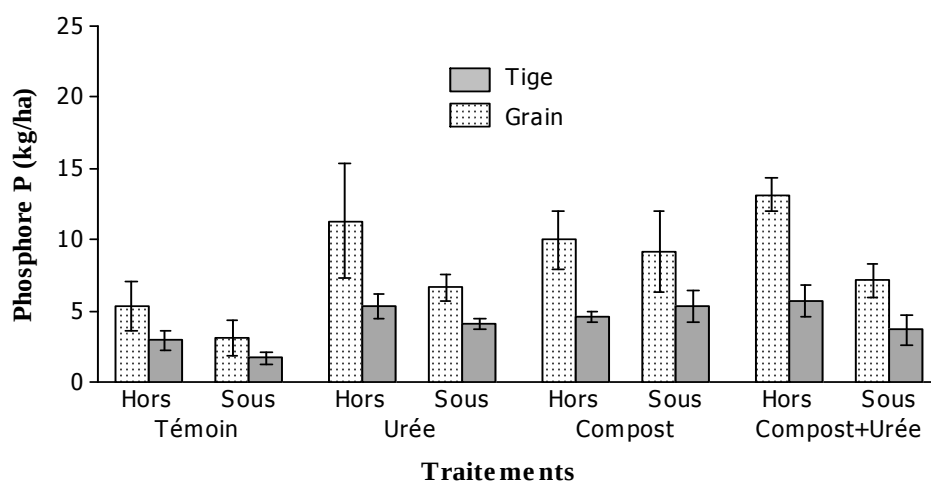
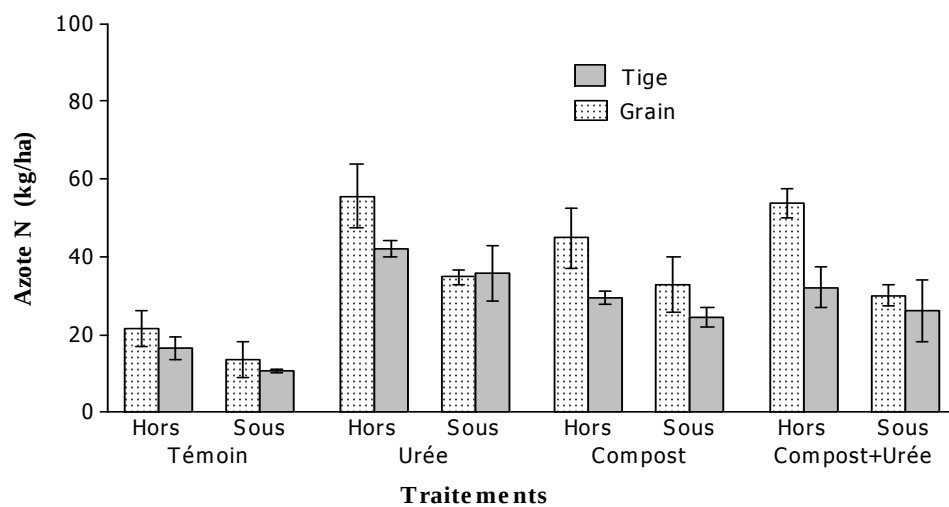


Figure 32. Azote total et phosphore total exportés par le maïs en fonction de la fumure appliquée sous et hors houppier des arbres dans le parc à karité. Dossi, Burkina Faso, saison des pluies 2006. (n = 4)

Tableau X. Valeurs de *F* et degré de signification de l'analyse de variance comparant le rendement grain du maïs dans les parcs à *Faidherbia* et à karité. Dossi, Burkina Faso, saisons des pluies 2004, 2005 et 2006. (n = 32)

Parc	Source de variation	ddl	2004	2005	2006
<i>F. albida</i>	Houppier	1	31,33*	15,57**	0,99 ^{ns}
	Fertilisation	3	0,31 ^{ns}	15,34**	23,03**
	Interaction	3	0,38 ^{ns}	0,18 ^{ns}	4,07*
	Variation résiduelle	24			
<i>V. paradoxa</i>	Houppier	1	3,31 ^{ns}	10,32*	48,51**
	Fertilisation	3	3,47 ^{ns}	6,35*	25,32**
	Interaction	3	13,39**	0,91 ^{ns}	4,51*
	Variation résiduelle	24			

^{ns} = non significatif au seuil de 5%

* = significatif au seuil de 5% (p<0,05)

** = significatif au seuil de 1% (p<0,01)

ddl = degré de liberté

n = nombre d'observations

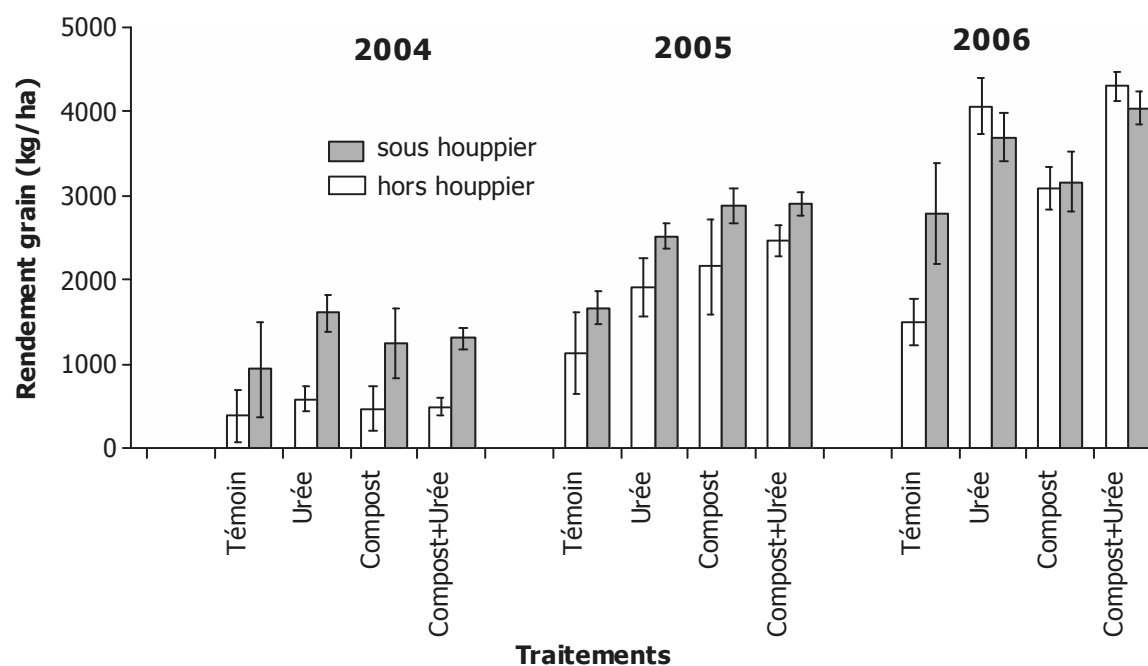


Figure 33. Rendement moyen du maïs en fonction de la fumure appliquée sous et hors houppier des arbres dans le parc à *Faidherbia*. Dossi, Burkina Faso, saisons des pluies 2004, 2005 et 2006. (n = 4)

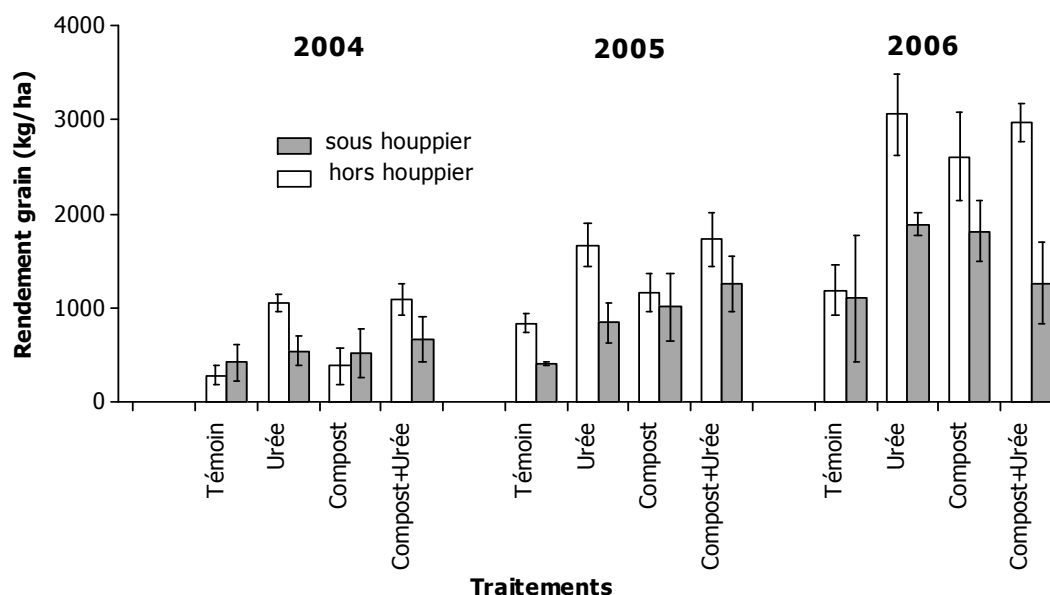


Figure 34. Rendement moyen du maïs en fonction de la fumure appliquée sous et hors houpier des arbres dans le parc à karité. Dossi, Burkina Faso, saisons des pluies 2004, 2005 et 2006. (n = 4)

En ce qui concerne le taux remplissage des épis de maïs, les résultats (figure 35) indiquent que ce taux a été relativement faible au cours de l'année 2004 à cause de l'insuffisance des pluies. Les quantités d'eau recueillies ont été de 610 mm repartis en 60 jours de pluie. Durant cette période, le taux de remplissage des épis a été en moyenne de 55 % sous le houpier et de 46 % en dehors du houpier de *Faidherbia*.

Dans le parc à karité, ce taux a été de 38 % sous le houpier et de 44 % en dehors du houpier. La bonne pluviométrie des saisons 2005 et 2006 a permis une amélioration de ces taux de remplissage dans les deux parcs.

Cette amélioration a été de 34 % sous le houpier et de 78 % en dehors du houpier de *Faidherbia* (figure 35a). Elle a été en moyenne de 70 % aussi bien sous le houpier qu'en dehors du houpier du karité (figure 35b).

L'analyse de variance révèle également que le taux remplissage des épis est significativement différent entre les fumures (tableau XI).

Dans le parc à *Faidherbia*, le taux de remplissage le plus élevé (91 %) a été obtenu avec la fumure compost + urée.

Dans le parc à karité, ce taux est de 85 % dans les parcelles fertilisées uniquement à l'urée. Le taux de remplissage dans toutes les parcelles fumées surpasse celui des parcelles témoins non fertilisées (figure 35).

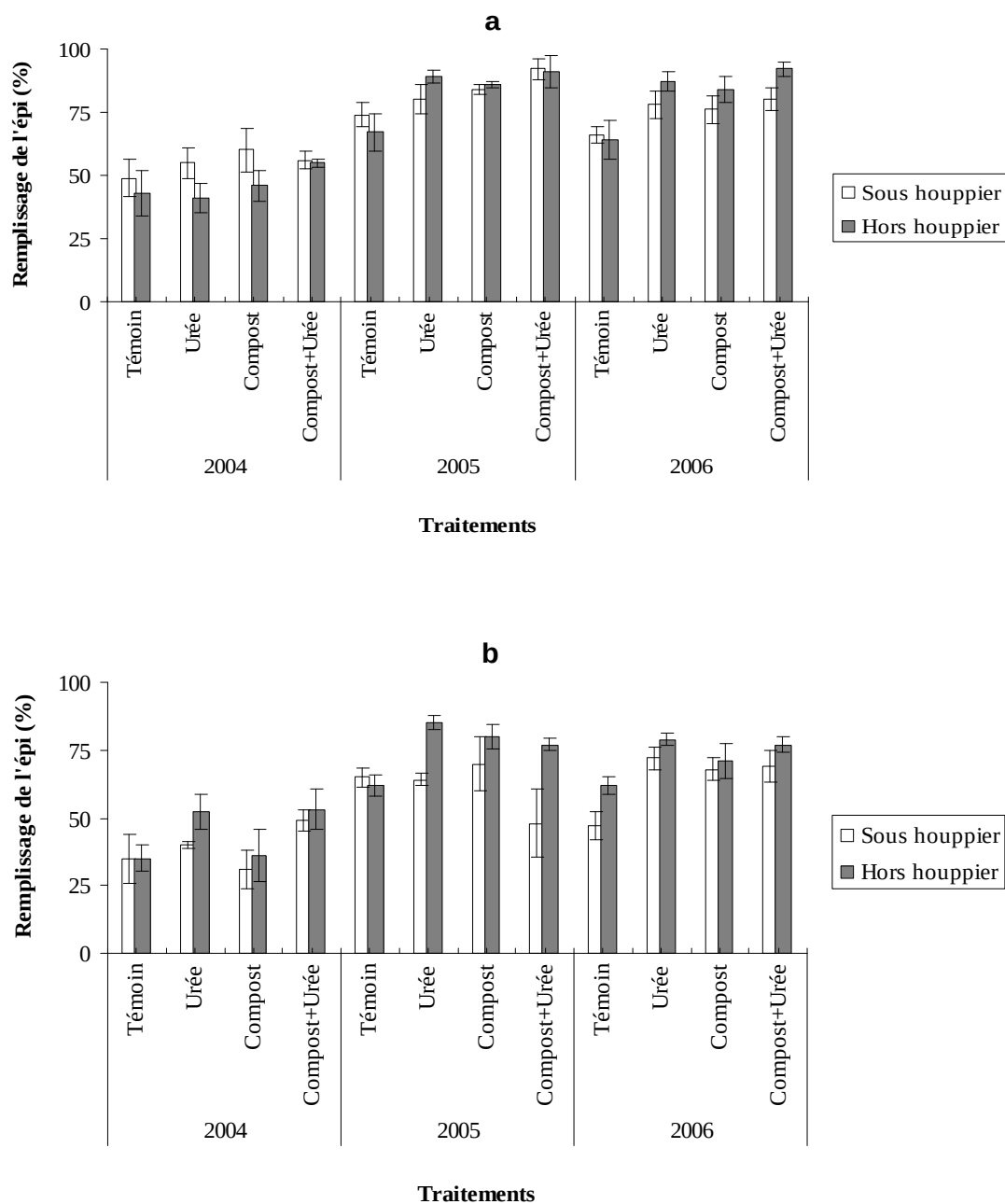


Figure 35. Taux de remplissage des épis de maïs en fonction de la fumure appliquée sous et hors houppier des arbres dans les parcs à *Faidherbia* (a) et à karité (b). Dossi, Burkina Faso, saisons des pluies 2004, 2005 et 2006.

Tableau XI. Valeurs de F et degré de signification de l'analyse de variance comparant le taux de remplissage des épis de maïs dans les parcs à faidherbia et à karité. Dossi, Burkina Faso, saisons des pluies 2004, 2005 et 2006. (n = 32)

Parc	Source de variation	ddl	2004	2005	2006
<i>F. albida</i>	Houppier	1	4,76 ^{ns}	0,06 ^{ns}	5,41 [*]
	Fertilisation	3	1,20 ^{ns}	8,57 ^{**}	9,27 ^{**}
	Interaction	3	0,67 ^{ns}	1,09 ^{ns}	1,13 ^{ns}
	Variation résiduelle	24			
<i>V. paradoxa</i>	Houppier	1	1,81 ^{ns}	12,54 ^{**}	5,84 [*]
	Fertilisation	3	4,40 [*]	2,61 ^{ns}	7,88 ^{**}
	Interaction	3	0,42 ^{ns}	2,70 ^{ns}	0,57 ^{ns}
	Variation résiduelle	24			

^{ns} = non significatif au seuil de 5%

^{*} = significatif au seuil de 5% (p<0,05)

^{**} = significatif au seuil de 1% (p<0,01)

ddl = degré de liberté

n = nombre d'observations

Les résultats obtenus sur le rendement grain du maïs permettent de confirmer les effets de l'arbre dans l'amélioration de la productivité des cultures. Les facteurs qui concourent à cette amélioration sont entre autre la fertilité des sols et l'eau.

En effet de par la litière, les arbres et les arbustes retournent au sol une grande quantité d'éléments nutritifs et de matière organique favorables à une bonne croissance des cultures associées et l'amélioration de l'infiltration de l'eau dans le sol. En dépit de l'insuffisance des pluies constatée en 2004, le rendement du maïs a été relativement plus élevé sous le houppier de *Faidherbia*, en particulier dans les parcelles témoins et sous le houppier du karité ainsi que dans les parcelles fertilisées au compost (figures 33 et 34).

L'amélioration de l'humidité du sol, à travers les remontées en surface des eaux souterraines (BONELL, 1993) explique en partie ce surplus de rendement observé sous les houppiers au cours des années sèches. Les apports de l'urée et du compost seuls ou de l'urée associée au compost ont significativement augmenté les rendements du maïs dans les deux parcs. Cette augmentation a été plus manifeste au cours des saisons les mieux arrosées confirmant ainsi l'importance du facteur eau pour le maïs et sa sensibilité aux effets néfastes de la sécheresse climatique. Des résultats similaires ont été rapportés sur le maïs par CHAMSHAMA *et al.* (1998) et sur le mil par BAYALA *et al.* (2003).

Si les quantités d'urée utilisées au cours de cet essai permettent de couvrir les besoins en azote du maïs et d'accroître les rendements, le coût élevé et l'inaccessibilité de cet engrais pourraient limiter son utilisation par les producteurs à faibles revenus.

L'alternative qui consiste à utiliser de l'urée à faible dose associée au compost serait une solution moins onéreuse dans la mesure où cette pratique permet d'obtenir un rendement comparable à celui de l'urée à la dose vulgarisée.

Les résidus de récolte qui servent à fabriquer ce compost sont beaucoup plus accessibles aux producteurs que le fumier (McNAIR BOSTICK *et al.*, 2007) mais la compétition pour leur utilisation comme combustible, fourrage ou matériaux de construction limite cette disponibilité (PIERI, 1989; HULUGALLE et MAURYA, 1991).

L'augmentation progressive du rendement grain du maïs durant les trois années consécutives (figures 33 et 34) s'explique en partie par les effets combinés de la fertilisation continue et de la bonne distribution des pluies. Un tel système, qualifié de monoculture sans rotation culturale, peut contribuer à réduire la productivité des cultures à long terme (BATIONO et BUERKERT, 2001) à cause du déséquilibre des bilans minéraux et de la prolifération du parasitisme.

Si le rendement du maïs augmente à proximité de *Faidherbia* pour des raisons de compétition minimale entre l'arbre et la culture (KHO *et al.*, 2001), il diminue en revanche au voisinage du tronc du karité (BREMAN et KESSLER, 1995; ZOMBOUDRE *et al.*, 2005b).

Cette diminution du rendement qui a été en moyenne de 30 % par rapport à la zone découverte pourrait être attribuée à une réduction de l'assimilation chlorophyllienne par les plantes (ZOMBOUDRE *et al.*, 2005a) due à une insuffisance de la quantité d'éclairement sous les houppiers (BOFFA *et al.*, 2000; BAYALA *et al.*, 2002). Le taux de remplissage des épis qui a aussi diminué de façon significative sous le houppier du karité contribue sans doute à creuser davantage l'écart de rendement entre ce milieu et la zone découverte.

Des résultats contraires, obtenus par JONSSON (1995) au Burkina Faso et DIAKITE (1995) au Mali, indiquent cependant que les rendements des cultures sont souvent meilleurs dans la zone d'influence du karité à cause d'une fertilité accrue du sol et du microclimat favorisé par l'ombre du houppier. Pour BOFFA (2000), ce phénomène est plus évident autour des arbres de petite taille. Au Malawi, par contre, RHOADES (1997) a trouvé que l'humidité et la fertilité du sol n'étaient pas plus élevées sous les petits houppiers de *Faidherbia* que dans la zone découverte mais celles-ci le devenaient de façon conséquente sous les houppiers de grande taille pendant la saison des pluies.

Conclusion partielle

Les résultats de cette étude réalisée dans les parcs à *Faidherbia* et à karité indiquent que les paramètres du climat tels que la température, l'humidité de l'air et la vitesse du vent qui déterminent l'évapotranspiration potentielle varient très peu comparativement à ceux de la zone écologique ouest du pays.

L'humidité de l'air a légèrement été accrue pendant la saison des pluies alors que la température minimale de l'air l'a été toute l'année. La vitesse des vents au sol s'est accélérée à l'approche de la mousson malgré la rugosité du paysage agricole due à la présence des arbres dont la densité est proche de 30 pieds/ha. L'humidité du sol a été plus accrue sous le houppier du karité et en dehors du houppier de *Faidherbia*. Cet excès d'humidité a quelque peu affecté la croissance et la productivité du maïs qui sont restées moins bonnes sous le houppier du karité et en dehors du houppier de *Faidherbia*.

L'apport de la fumure organo-minérale associant l'urée et le compost à faible dose a permis également d'améliorer le rendement grain du maïs avec un niveau comparable à celui de l'urée appliquée à la dose vulgarisée. En dépit du court terme de expérimentation, la pratique de la fertilisation organo-minérale du maïs dans les parcs semble être une option appropriée pour les producteurs car elle permet de réduire le coût d'achat de l'engrais minéral et ses effets néfastes sur le sol.

Cette pratique dans le parc à karité devrait s'accompagner de techniques sylvicoles pour améliorer la performance des cultures sous-jacentes et limiter les compétitions pour les besoins en ressources de croissance tels que l'eau, la lumière et les éléments nutritifs.

CONCLUSION GENERALE

L'agroforesterie peut être considérée de nos jours comme une technologie agricole durable à faible apport externe pour les pays en développement qui n'ont pas toujours la possibilité d'importer les intrants nécessaires pour améliorer les récoltes. La mise en culture de la plupart des sols tropicaux avec une fertilisation exclusivement minérale, entraîne une baisse systématique du taux de matière organique. Lorsque ce taux passe en dessous de 0,6 %, la matière organique du sol devient un facteur limitant pour la réponse aux engrais.

Les résultats que nous avons obtenus indiquent que la litière produite annuellement par le karité et le *Faidherbia* permet de conserver au moins ce seuil et contribue à enrichir le sol en éléments nutritifs. Cet enrichissement a été plus prononcé pour l'azote que pour le phosphore.

Par ailleurs, l'accumulation de cette litière sous les arbres a occasionné une disponibilité accrue en eau du sol suite à l'amélioration de l'infiltration de l'eau dans le profil cultural. Il ressort également de l'analyse comparée des intensités des pluies et de la capacité des sols à infiltrer l'eau que la présence des arbres dans les exploitations agricoles contribue à réduire le ruissellement et par conséquent l'érosion hydrique.

Ces effets bénéfiques sur le sol n'ont cependant pas pu favoriser la croissance et la productivité du maïs qui demeurent plus faibles dans le parc à karité. Cette diminution des performances des cultures à proximité des karités est relative à l'effet de l'ombre du houppier qui ralentit l'activité photosynthétique.

En revanche, dans le parc à *Faidherbia*, l'ombre induite par les branches dépourvues de feuilles affecte moins à la baisse la croissance, la nutrition minérale et la productivité du maïs. A cause de sa phénologie inversée, le *Faidherbia* apporte beaucoup d'éléments fertilisants en fin de saison sèche, période propice à l'incorporation de la litière dans le sol au moment des travaux agricoles. Cette litière, qui s'enrichit souvent avec les excréments du bétail attiré par l'ombre et le fourrage, confère aux sols situés à proximité de *Faidherbia*, des attributs permettant aux cultures de se développer et de produire autant, que sur les sols dépourvus d'arbres et bénéficiant d'une fertilisation exclusivement minérale.

L'agriculture peut être intensifiée autour des arbres à conditions de trouver dans ce milieu un microclimat favorable et d'apporter un complément d'engrais minéral ou organique pour pallier un éventuel épuisement des réserves minérales du sol. Les résultats obtenus montrent bien que l'apport de ce complément dans les parcs à karité et à *Faidherbia* présente au moins un avantage agronomique réel. La pratique de l'agroforesterie mérite d'être encouragée dans la zone d'étude malgré la faible densité ligneuse des parcs. Cette densité, même si elle venait à être améliorée, devrait tenir compte de la mécanisation de l'agriculture

qui connaît un essor important dans la zone à cause de la culture du coton. La densité actuelle des arbres dans les deux parcs ne constitue pas un obstacle aux opérations de labour et de sarclage mais elle semble limiter les apports organiques nécessaires pour maintenir la fertilité des sols.

Parmi les fumures apportées dans les parcs, l'urée et l'association urée/compost apparaissent comme les meilleures et autorisent une bonne croissance des plants et une productivité acceptable. L'association est toutefois plus bénéfique que l'urée dans la mesure où elle permet de réduire le coût des engrais minéraux qui n'est pas à la portée des producteurs sans revenu substantiel.

L'option d'utiliser le compost est souvent limitée par la disponibilité des résidus de récolte, et pourrait être complétée par le paillis de feuilles vertes issues des émondes de karité et le compostage de sa litière foliaire qui, de façon naturelle, se décompose plus lentement dans le sol.

Pour améliorer la productivité des cultures dans le parc à karité il est nécessaire d'adopter des techniques de gestion sylvicole permettant de réduire la demande en ressources de croissance (eau, lumière et éléments nutritifs) pour les arbres qui exercent une forte concurrence sur les cultures. Il s'agit entre autres de l'émondage, de la taille des couronnes trop compactes ou du choix des sujets de forme allongée portant des feuilles vers le sommet et dégarnie à la base. En conséquence, un rapport hauteur de tronc/diamètre de la couronne élevé est requis pour assurer l'accès maximum de la lumière sous le feuillage.

Les effets bénéfiques de *Faidherbia* sur le sol et les cultures étant surtout le fait des arbres âgés, la protection et la stimulation de la régénération naturelle ou artificielle par les populations locales peuvent permettre d'une part de conserver et d'enrichir les parcs existants tout en assurant une meilleure couverture des sols et d'autre part d'intensifier l'agriculture pour lutter contre la faim et la pauvreté en milieu rural.

Toutefois, pour assurer une gestion plus efficiente du karité et du *Faidherbia* dans les agrosystèmes et permettre une meilleure utilisation de l'eau dans les interfaces arbres-cultures, l'approfondissement de la connaissance du comportement de ces espèces à travers les thématiques suivantes est nécessaire :

- ☞ L'étude de la minéralisation du carbone de la litière foliaire de *V. paradoxa* selon le climat et le sol.
- ☞ L'influence des deux espèces agroforestières sur la stabilité structurale des sols.
- ☞ La détermination et la modélisation des flux hydriques à l'échelle du versant dans le continuum sol-plante-atmosphère.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

ABDOU M.M.K, 1996. *Environnement de Faidherbia albida* (Del.) A. Chev. *Caractérisation, exploitation et perspectives d'optimisation dans les zones soudano-sahéliennes de l'Afrique de l'Ouest*. Thèse de troisième cycle, Université de Cocody/Abidjan, Côte d'Ivoire.

ALEXANDRE D.Y. et OUERAOGO S.J. 1993. Variations de la morphologie de *Faidherbia albida* en relation avec le sol et effets agronomiques de l'arbre. In: *Faidherbia albida* dans les zones tropicales semi-arides d'Afrique de l'Ouest: comptes rendus d'un atelier, 22-26 avril 1991, Niamey, Niger (R.J. VANDENBELT et C. RENARD, eds). ICRISAT, Patancheru, Inde, et ICRAF, Nairobi, Kenya, pp. 107-110.

ALLEN R.G., PEREIRA L.S., RAES D. et SMITH M., 1998. *Crop evapotranspiration: Guidelines for computing crop requirements*. Irrigation and Drainage Paper No. 56, FAO, Rome, Italy, 300 p.

ALLEN R.G., PRUITT W.O., WRIGHT J.L., HOWELL T.A., VENTURA F., SNYDER R., ITENFISU D., STEDUTO P., BERENGENA J., YRISARRY J.B., SMITH M., PEREIRA L.S., RAES D., PERRIER A., ALVES I., WALTER I. et ELLIOTT R., 2006. A recommendation on standardized surface resistance for hourly calculation of reference ETo by the FAO56 Penman-Monteith method. *Agricultural Water Management* **81**: 1-22.

ANGULO-JARAMILLO R., VANDERVAERE J.P., ROULIER S., THONY J.L., GAUDET J.P. et VAUCLIN M., 2000. Field measurement of soil surface hydraulic properties by disc and ring infiltrometers: A review and recent developments. *Soil and Tillage Research* **55**:1-29.

ANKENY M.D., AHMED M., KASPAR T.C. et HORTON R., 1991. Simple field method for determining unsaturated hydraulic conductivity. *Soil Science Society of America Journal* **55**:467-470.

AZHARI R., 1988. *Zonage agroclimatique du maïs sur six stations synoptiques au Togo*. Mémoire de fin d'étude, ENITEF, Nogent sur Vernisson, 77 p.

BADO B.V., SEDOGO P.M., CESCAS P.M., LOMPO F. et BATIONO A., 1997. Effet à long terme des fumures sur le sol et les rendements du maïs au Burkina Faso. *Cahiers Agricultures* **6**:571-575.

BALDY C. et STIGTER C.J., 1993. *Agrométéorologie des cultures multiples en régions chaudes*. INRA, Paris, 246 p.

BAMBARA D., 1993. *Dynamique de la matière organique selon les systèmes de culture dans les sols agricoles du finage de Thiougou. Approche quantitative*. Mémoire de fin d'études, Université de Ouagadougou, 100 p.

BARLOY J., 1984. Phase germinative, levée et implantation. In: INRA (ed.), *Physiologie du maïs*. INRA, Paris, pp. 13-48.

BATIONO A. et BUERKERT A., 2001. Soil organic carbon management for sustainable land use in Sudano-Sahelian West Africa. *Nutrient Cycling in Agroecosystems* **61**:131-142.

BAUMER M., 1995. *Arbres, arbustes et arbrisseaux nourriciers en Afrique occidentale.* Enda, Dakar, 252 p.

BAYALA J., MANDO A., OUEDRAOGO S.J. et TEKLEHAIMANOT Z., 2003. Managing *Parkia biglobosa* and *Vitellaria paradoxa* Prunings for Crop Production and Improved Soil Properties in the Sub-Sudanian Zone of Burkina Faso. *Arid Land Research and Management* **17**:283-296.

BAYALA J., MANDO A., TEKLEHAIMANOT Z. et OUEDRAOGO S.J., 2005. Nutrient release from decomposing leaf mulches of karite (*Vitellaria paradoxa*) and nere (*Parkia biglobosa*) under semi-arid conditions in Burkina Faso, West Africa. *Soil Biology and Biochemistry* **37**:533-539.

BAYALA J., TEKLEHAIMANOT Z. et OUEDRAOGO S.J., 2002. Millet production under pruned tree crowns in a parkland system in Burkina Faso. *Agroforestry Systems* **54**:203-214.

BELSKY A.J., AMUNDSON R.G., DUXBURY J.M., RIHA S.J., ALI A.R. et MWONGA S.M., 1989. The effects of trees on their physical, chemical, and biological environments in a semi-arid savanna in Kenya. *Journal of Applied Ecology* **26**:1005-1024.

BOFFA J.M., 1995. *Productivity an management of agroforestry parklands in the Sudan Zone of Burkina Faso, West Africa.* PhD, Perdue University, USA, 99 p.

BOFFA J.M., 2000. *Les parcs agroforestiers en Afrique subsaharienne.* Cahier FAO Conservation n° 34, 258 p.

BONELL M., 1993. Progress in the understanding of runoff generation dynamics in forests. *Journal of Hydrology* **150**:217-275.

BONELL M., 2005. Runoff generation in tropical forests. In: M. BONELL et L.A. BRUIJNZEEL (eds.), *Forest-water-people in the humid tropics: Past present and future hydrological research for integrated land and water management.* Cambridge University Press, Cambridge, pp. 314-406.

BONELL M. et BALEK J., 1993. Recent scientific developments and research needs in hydrological processes of the humid tropics. In: M. BONELL, M.M. HUFSCHMIDT et J.S. GLADWELL (eds.), *Hydrology and water management in the humid tropics - Hydrological research issues and strategies for water management.* Cambridge University press, Cambridge, pp. 167-260.

BONHOMME R., 1984. Fonctionnement photosynthétique du couvert végétal. In: INRA (ed.), *Physiologie du maïs.* INRA, Paris, pp. 147-162.

BONKOUNGOU E.G., 1987a. Monographie de *Acacia albida* Del., espèce agroforestière à usages multiples. IRBET/CNRST, 92 p + annexes.

BONKOUNGOU E.G., 1987b. Monographie du karité (*Butyrospermum paradoxum*), espèce agroforestière à usages multiples. IRBET, Ouagadougou, 69 p.

BONKOUNGOU E.G., 1993. Fonctions socioculturelles et économiques d'*Acacia albida* en Afrique de l'Ouest. In: *Faidherbia albida* dans les zones tropicales semi-arides d'Afrique de l'Ouest: comptes rendus d'un atelier, 22-26 avril 1991, Niamey, Niger (R.J. VANDENBELT et C. RENARD, eds). ICRISAT, Patancheru, Inde, et ICRAF, Nairobi, Kenya, pp. 1-6.

BOUSSIM J., 1991. *Contribution à l'étude des Tapinanthus parasites du Burkina Faso.* Thèse de troisième cycle, Université de Ouagadougou, Burkina Faso, 152 p.

BREMAN H. et KESSLER J.J., 1995. *Woody Plants in Agro-Ecosystems of Semi-Arid Regions.* Springer-Verlag ed., Berlin, Heidelberg, 368 p.

BUNASOLS, 1987. *Méthodes d'analyse physiques et chimiques es eaux et du sol.* Document technique n°3, 159 p.

CAMPBELL SCIENTIFIC INC, 2002. Manuel d'utilisation de la CS616, réflectomètre de teneur en eau, 29 p.

CHAMSHAMA S.A.O., MUGASHA A.G., KLOVSTAD A., HAVERAAEN O. et MALIONDO S.M.S., 1998. Growth and yield of maize alley cropped with *Leucaena leucocephala* and *Faidherbia albida* in Morogoro, Tanzania. *Agroforestry Systems* **40**:215-225.

CHEVALIER A., 1934. Nouvelles observations sur quelques *Acacia* de l'Afrique occidentale. *Revue de Botanique Appliquée* **14**:875-884.

CLASSEN M.M. et SHOW R.H., 1970. Water deficit effects on corn. II. Grain components. *Agronomy Journal* **62**:652-655.

COQUET Y., BOUCHER A., LABAT C., VACHIER P. et ROGER-ESTRADE J., 2000. Caractérisation hydrodynamique des sols à l'aide de l'infiltromètre à disques. Aspects théoriques et pratiques. *Etude et Gestion des Sols* **7**:7-24.

CTFT, 1989. *Faidherbia albida* (Del.) A. Chev. Monographie. Centre Technique Forestier Tropical, Nogent-sur-Marne, 72 p.

DELOLME A., 1947. Etude du karité à la station agricole de Ferkéssédougou. *Oléagineux* **4**:186-200.

DENMEAD O.T. et SHAW R.H., 1960. The effects of soil moisture stress at different stages of growth on the development and yield of corn. *Agronomy Journal* **52**:272-274.

DEPOMMIER D., 1996. *Structure dynamique et fonctionnement des parcs à Faidherbia albida (Del.) A. Chev.. Caractérisation et incidence des facteurs biophysiques et anthropiques sur l'aménagement et le devenir des parcs de Dossi et de Watinoma, Burkina Faso.* . Thèse de Doctorat, Université Pierre et Marie Curie, Paris VI, France, 519 p.

DEPOMMIER D. et GUERIN H., 1996. *Emondage traditionnel de Faidherbia albida. Production fourragère, valeur nutritive et récolte de bois à Dossi et à Watinoma (Burkina Faso).* Cahiers Scientifiques du CIRAD-Forêt, n° **12**. CIRAD-ORSTOM-CORAF, pp. 55-84.

DEVINEAU J.-L., FOURNIER A. et KALOGA B., 1997. *Les sols et la végétation de la région de Bondoukui (Ouest burkinabé)*. Orstom ed., Paris, France, 117 p.

DGPSA, 2005. *Performance de l'agriculture 1994-2004*. Rapport technique, Ouagadougou, 65 p.

DIAKITE T., 1995. *Concurrence pour l'eau et les éléments nutritifs du sol entre ligneux et cultures. Le karité et le sorgho en zone semi-aride au Mali*. Mémoire M.Sc., Univ. Laval, Québec, Canada, 69 p.

DUCOUSSO M. et COLONNA J.P., 1993. Infection endomycorhizienne chez les jeunes *Faidherbia albida*: influence sur la croissance et le développement. In: *Faidherbia albida* dans les zones tropicales semi-arides d'Afrique de l'Ouest: comptes rendus d'un atelier, 22-26 avril 1991, Niamey, Niger (R.J. VANDENBELT et C. RENARD, eds). ICRISAT, Patancheru, Inde, et ICRAF, Nairobi, Kenya, pp. 151-156.

EDMEADES G.O., BOLANOS J., LAFITTE H.R. et LISTMAN G.M., 1995. Des progrès dans l'amélioration génétique du maïs pour la tolérance à la sécheresse. *Agriculture et développement* 2:64-65.

FAO, 1988. *FAO-UNESCO soil map of the world. Revised legend*. FAO, Rome, 119 p.

FAO, 2000. Annuaire FAO de la production. *Collection FAO statistique* 163:71-83.

FONTES J. et GUINKO S., 1995. *Carte de la végétation et de l'occupation du sol du Burkina Faso*. Laboratoire d'Ecologie Terrestre, Institut de la Carte Internationale de la Végétation, CNRS, Université de Toulouse III (France), Institut du Développement Rural, Faculté des Sciences et Techniques, Université de Ouagadougou (Burkina Faso), 69 p.

GARDNER W.R., 1958. Some steady-state solutions of the unsaturated moisture flow equation with application to evaporation from a water table. *Soil Science* 85:228-232.

GNANKAMBARY Z., 2007. *Compost and Fertilizer Mineralization Effects on Soil and Harvest in Parkland Agroforestry Systems in the South-Sudanese Zone of Burkina Faso*. PhD, Swedish University of Agricultural Sciences, Umeå, 47 p.

GNANKAMBARY Z., BAYALA J., MALMER A., NYBERG G. et HIEN V., in press. Decomposition and nutrient release from mixed plant litters of contrasting quality in an agroforestry parkland in the south-Sudanese zone of West Africa. *Nutrient Cycling in Agroecosystems*.

GOUNOT M., 1969. *Méthodes d'étude quantitative de la végétation*. Masson et Cie ed., Paris, 305 p.

GRANT R.F., JACKSON B.S., KINRY J.R. et ARKIN G.F., 1989. Water deficit timing effects on yield components in maize. *Agronomy journal* 81:61-65.

GUINKO S., 1984. *Végétation de la Haute Volta. Tome I*. Thèse d'état, Université de Bordeaux III, France, 318 p.

HALL J.B., AEBISCHER D.P., TOMLINSON H.F., OSEI-AMANING E. et HINDLE J.R., 1996. *Vitellaria paradoxa*: a monograph. School of Agricultural and Forest Sciences publication Number: 8, University of Wales, Bangor, 105 p.

HANSSON L., 2006. *Comparisons of Infiltrability Capacities in Different Parlands and Farming Systems of Semi-Arid Burkina Faso*. MSc, Swedish University of Agriculture Science, Umeå, Sweden, 20 p.

HAVERKAMP R., ROSS P.J., SMETTEM K.R.J. et PARLANGE J.Y., 1994. Three-dimensional analysis of infiltration from the disc infiltrometer. 2. Physically based infiltration equation. *Water Resources Research* **30**:2931-2935.

HEMA D., 1994. *Etude de la résistance à la sécheresse chez le maïs (Zea Mays L.). Analyse de la variabilité génétique de quelques caractères agrophysiologiques*. Thèse de Doctorat, Université Nationale de Côte d'Ivoire, Abidjan, Côte d'Ivoire, 151 p.

HILLEL D., 2004. *Introduction to Environmental Soil Physics*. Academic Press, USA, 494 p.

HOOGMOED W.B. et STROOSNIJDER L., 1984. Crust formation on sandy soils in the Sahel I. Rainfall and infiltration. *Soil & Tillage Research* **4**:5-23.

HULUGALLE N.R. et MAURYA P.R., 1991. Tillage systems for the west African semi-arid tropics. *Soil & Tillage Research* **20**:187-199.

ILSTEDT U., MALMER A., VERBEETEN E. et MURDIYARSO D., 2007. The effect of afforestation on water infiltration in the Tropics: A systematic review and meta-analysis. *Forest Ecology and Management* **251**:45-51.

JONSSON K., 1995. *Agroforestry in dry savanna areas in Africa : interactions between trees, soils and crops*. PhD, Swedish University of Agricultural Sciences, Umea, Sweden, 92 p.

JONSSON K., ONG C.K. et ODONGOS J.C.W., 1999. Influence of scattered nere and karite on microclimate, soil fertility and millet yield in Burkina Faso. *Expérimental Agriculture* **35**:39-53.

JUNG G., 1969. Cycles biogéochimiques dans un écosystème de région tropicale sèche: *Acacia albida* (Del.) - Sol ferrugineux tropical peu lessivé (Dior). *Oecol Plant* **4**:195-210.

KATER L.J.M., KANTE S. et BUDELMAN A., 1992. Karité (*Vitellaria paradoxa*) and néré (*Parkia biglobosa*) associated with crops in South Mali. *Agroforestry Systems* **18**:89-105.

KESSLER J.J., 1992. The influence of karité (*Vitellaria paradoxa*) and néré (*Parkia biglobosa*) trees on sorghum production in Burkina Faso. *Agroforestry Systems* **17**:97-118.

KHO R.M., YACOUBA B., YAYE M., KATKORE B., MOUSSA A., IKTAM A. et MAYAKI A., 2001. Separating the effects of trees on crops: the case of *Faidherbia albida* and millet in Niger. *Agroforestry Systems* **52**:219-238.

KOWAL J.M. et KASSAM A.H., 1978. *Agricultural ecology of Savanna. A study of west Africa.* Oxford University Press, pp. 251-258.

LAL R., 1989a. Agroforestry systems and soil surface management of a tropical alfisol. *Agroforestry Systems* **8**:197-215.

LAL R., 1989b. Agroforestry systems and soil surface management of a tropical alfisol: I. Soil moisture and crop yields. *Agroforestry Systems* **8**:7-29.

LAL R., 1989c. Agroforestry systems and soil surface management of a tropical alfisol: V. Water infiltrability, transmissivity and soil water sorptivity. *Agroforestry Systems* **8**:217-238.

LIZASO J.I., BATCHELOR W.D. et WESTGATE M.E., 2003. A leaf area model to simulate cultivar-specific expansion and senescence of maize leaves. *Field Crops Research* **80**:1-17.

LOGSDON S.D. et JAYNES D.B., 1993. Methodology for determining hydraulic conductivity with tension infiltrometers. *Soil Science Society of America Journal* **57**:1426-1431.

LOUPPE D., OLIVIER R., OUATTARA N. et FORTIER M., 1998. Impacts des feux répétés sur les sols des savanes du centre de la Côte d'Ivoire. Communication faite lors du Séminaire International sur l' "aménagement intégré des forêts naturelles dans la zone tropicale sèche de l'Afrique de l'ouest", Ouagadougou, Burkina Faso, 16-20 novembre 1998, 11 p.

MAIGA A., 1987. *L'arbre dans les systèmes agroforestiers traditionnels dans la province du Bazèga. Influence du karité, du néré et de Acacia albida sur le sorgho et le mil.* Rapport de stage. IRBET/CNRST, Ouagadougou, 86 p.

MALMER A., JOHANSSON E. et KLUGE M., 1999. natural rehabilitation of disturbed tropical rainforest soils in Sabah, Malaysia. In: A. SCHULTE et D. RUHIYAT (eds.), *Soils of Tropical Forest Ecosystems*. Springer, Heidelberg, pp. 199-204.

MANDO A., 1997. *The role of termites and mulch in the rehabilitation of crusted Sahelian soils.* PhD thesis, Wageningen Agricultural University, Wageningen, The Netherlands, 101p.

MARSHALL T.J., 1958. A relation between permeability and size distribution of pores. *Journal of Soil Science* **9**:1-8.

MATHIEU C. et PIELTAIN F., 1998. *Analyse Physique Des Sols. Méthodes choisies.* Lavoisier, Technique et Documentation ed., Paris, 265 p.

MCNAIR BOSTICK W., BADO B.V., BATIONO A., SOLER C.T., HOOGENBOOM G. et JONES J.W., 2007. Soil carbon dynamics and crop residue yields of cropping systems in the Northern Guinea Savanna of Burkina Faso. *Soil & Tillage Research* **93**:138-151.

MIEHE S., 1986. *Acacia albida* and other multipurpose trees on the fur farmlands in the Jebel Marra Highland, Western Darfur, Sudan. *Agroforestry Systems* **4**:89-119.

MONTEITH J.L., ONG C.K. et CORLETT J.E., 1991. Microclimatic interactions in agroforestry systems. *Forest Ecology and Management* **45**:31-44.

MÖTTUS M., ROSS J. et SULEV M., 2001. Experimental study of ratio of PAR to direct integral solar radiation under cloudless conditions. *Agricultural and Forest Meteorology* **109**:161-170.

NONGONIERMA A., 1979. Contribution à l'étude biosystématique du genre *Acacia* Miller en Afrique occidentale. X Phénologie en culture et dans la nature, types biologiques, nombres chromosomiques. *Bull. I.F.A.N., t. 41, sér. A, n° 4*, pp. 732-760.

NYBERG G. et HÖGBERG P., 1995. Effets of young agroforestry trees on soils in farm situations in Western Kenya. *Agroforestry Systems* **32**:145-152.

OKULLO J.B.L., HALL J.B. et OBUA J., 2004. Leafing, flowering and fruiting of *Vitellaria paradoxa* subsp. *nilotica* in savanna parklands in Uganda. *Agroforestry Systems* **60**:77-91.

OUATTARA B., OUATTARA K., SERPENTIE G., MANDO A., SEDOGO P. et BATIONO A., 2006. Intensify cultivation induced effects on soil organic carbon dynamic in the western cotton area of Burkina Faso. *Nutrient Cycling in Agroecosystems* **76**:331-339.

OUATTARA K., 2007. *Improved soil and water conservatory managements for cotton-maize rotation system in the western cotton area of Burkina Faso.* PhD, Swedish University of Agricultural Science, Umeå, Sweden, 50 p.

OUATTARA K., OUATTARA B., ASSA A. et SEDOGO P.M., 2006. Long-term effect of ploughing, and organic matter input on soil moisture characteristics of a Ferric Lixisol in Burkina Faso. *Soil and Tillage Research* **88**:217-224.

OUATTARA K., OUATTARA B., NIBERG G., SEDOGO P. et MALMER A., 2007. Ploughing frequency and compost application effects on soil infiltrability in a cotton-maize (*Gossypium hirsutum-Zea mays* L.) rotation system on a Ferric Luvisol and a Ferric Lixisol in Burkina Faso. *Soil & Tillage Research* **95**:288-297.

OUEDRAOGO E., MANDO A. et ZOMBRE N.P., 2001. Use of compost to improve soil properties and crop productivity under low input agricultural system in West Africa. *Agriculture, Ecosystems & Environment* **84**:259-266.

OUEDRAOGO J.S., 1993. La multiplication végétative de *Faidherbia albida*: évolution comparée des parties souterraines et aériennes de plants issus de semis et de bouturage. *Bois et Forêts des Tropiques* **237**:31-43.

OUEDRAOGO S.J., 1995. Les parcs agroforestiers au Burkina Faso. Rapport AFRE-NA n°79. CIRAf, Nairobi, Kenya, 76p.

PHILIP J.R., 1957. The theory of infiltration: 4. Sorptivity and algebraic infiltration equations. *Soil Science* **84**:257-264.

- PHILIP J.R., 1969.** Theory of Infiltration. *Advances in hydrosociences* 5:215-296.
- PHIRI E., VERPLANCKE H., KWESIGA F. et MAFONGOYA P., 2003.** Water balance and maize yield following improved sesbania fallow in eastern Zambia. *Agroforestry Systems* 59:197-205.
- PIERI C., 1989.** *Fertilité des terres de savanes. Bilan de 30 ans de recherche et de développement agricoles au sud du Sahara.* Ministère de la Coopération et CIRAD-IRAT ed., Paris, France, 444p.
- POMMEL B. et BONHOMME R., 1998.** Variations in the vegetative and reproductive systems in individual plants of an heterogeneous maize crop. *European Journal of Agronomy* 8:39-49.
- PURSEGLOVE J.W., 1972.** *Tropical crops. Monocotyledons.* Longman Scientific & Technical ed., 607 p.
- REYNOLD W.D. et ELRICK D.E., 1990.** Ponded infiltration from a single ring: I. Analysis of steady flow. *Soil Science Society of America Journal* 54:1233-1241.
- REYNOLDS W.D. et ELRICK D.E., 1991.** Determination of Hydraulic Conductivity Using a Tension Infiltrometer. *Soil Science Society of America Journal* 55:633-639.
- RHOADES C.C., 1997.** Single-tree influences on soil properties in agroforestry: lessons from natural forest and savanna ecosystems. *Agroforestry Systems* 35:71-94.
- RICHARDS B.N., 1987.** *The Microbiology of Terrestrial Ecosystems.* Longman, Harlow ed., 399 p.
- ROBELIN M., 1984.** Fonctionnement hydrique et adaptation à la sécheresse. In: INRA (ed.), *Physiologie du maïs.* INRA, Paris, pp. 445-476.
- RONDEUX J., 1993.** *Les mesure des arbres et des peuplements forestiers.* les Presses agronomiques de Gembloux ed., Belgique, 521p.
- ROSS J. et SULEV M., 2000.** Sources of errors in measurements of PAR. *Agricultural and Forest Meteorology* 100:103-125.
- ROUPSARD O., 1997.** *Ecophysiologie et diversité génétique de *Faidherbia albida* (Del.) A. Chev. (syn. *Acacia albida* Del.), un arbre à usages multiples d'Afrique Semi-Aride.* Thèse de Doctorat, Université de Nancy I, France, 58 p.
- ROUPSARD O., FERHI A., GRANIER A., PALLO F., DEPOMMIER D., MALLET B., JOLY H.I. et DREYER E., 1999.** Reverse phenology and dry-season water uptake by *Faidherbia albida* (Del.) A. Chev. in an agroforestry parkland of Sudanese west Africa. *Functional Ecology* 13: 460-472.
- ROWELL D.L., 1994.** *Soil Science: Methodes and Applications.* Longman Group ed., United Kingdom, 350p.

RUYSSEN B., 1957. Le karité au Soudan. *Agronomie Tropicale* **XI, XII, XII**:144-172, 279-306, 415-438.

SANCHEZ P.A., 1995. Science in agroforestry. *Agroforestry Systems* **30**:5-55.

SANON M., 1999. *Optimisation de l'irrigation à la parcelle par radiothermométrie. Application à une culture d'oignon (Allium cepa L.) en climat sahélien (Nord-Ouest du Burkina Faso).* Thèse de Doctorat, ENSA, Rennes, France, 266 p.

SANOU J., 1993. *Choisir sa variété de maïs au Burkina Faso.* CNRST/INERA, Ouagadougou, Burkina Faso.

SAVADOGO P., SAWADOGO L. et TIVEAU D., 2007. Effects of grazing intensity and prescribed fire on soil physical and hydrological properties and pasture yield in the savanna woodlands of Burkina Faso. *Agriculture, Ecosystems and Environment* **118**: 80-92.

SEDOGO P.M., 1993. *Evolution des sols ferrugineux lessivés sous culture: Incidence des modes de gestion sur la fertilité.* Thèse de doctorat ès sciences, Université Nationale de Côte d'Ivoire, Abidjan, Côte d'Ivoire, 332p.

SINCLAIR F.L., 1999. A general classification of agroforestry practice. *Agroforestry Systems* **46**:161-180.

SIVAKUMAR M.V.K. et GNOUMOU F., 1987. Agroclimatology of West Africa. Burkina Faso. *ICRISAT Information Bulletin* **23**:1-62.

SOME L., 1989. *Diagnostic agropédoclimatique du risque de sécheresse au Burkina Faso. Etude de quelques techniques agronomiques améliorant la résistance pour les cultures de sorgho, de mil et de maïs.* Thèse de Doctorat, Univ. Montpellier II, France, 235p.

SZOTT L.T. et KASS D.C.L., 1993. Fertilizers in agroforestry systems. *Agroforestry Systems* **23**:157-176.

TODOROFF P., LANGELLIER, P., 1998. Comparison of empirical and partly deterministic methods of time domain reflectometry calibration, based on a study of two tropical soils. *Soil & Tillage Research* **45**:325-340.

TOMLINSON H., TRAORE A. et TEKLEHAIMANOT Z., 1998. An investigation of the root distribution of *Parkia biglobosa* in Burkina Faso, West Africa, using a logarithmic spiral trench. *Forest Ecology and Management* **107**:173-182.

TRAORE K., GANRY F., OLIVER R. et GIGOU J., 2004. Litter Production and Soil Fertility in a *Vitellaria paradoxa* Parkland in a Catena in Southern Mali. *Arid Land Research and Management* **18**:359-368.

UDO S.O. et ARO T.O., 1999. Global PAR related to global solar radiation for central Nigeria. *Agricultural and Forest Meteorology* **97**:21-31.

VAN NOORDWIJK M., WIDIANTO, HEINEN M. et HAIRIAH M., 1991. Old tree root channels in acid soils in the humid tropics: importance for crop root penetration, water infiltration and nitrogen management. *Plant and Soil* **134**:37-44.

VANDENBELDT R.J., (ed.) 1992. *Faidherbia albida* in the West African Semi-Arid Tropics. ICRISAT, Patancheru, India, 206 p.

VANDENBELDT R.J. et WILLIAMS J.H., 1992. The effect of soil surface-temperature on the growth of millet in relation to the effect of *Faidherbia albida* trees. *Agricultural and Forest Meteorology* **60**:93-100.

VANDERVAERE J.P., PEUGEOT C., VAUCLIN M., ANGULO JARAMILLO R. et LEBEL T., 1997. Estimating hydraulic conductivity of crusted soils using disc infiltrometers and minitensiometers. *Journal of Hydrology* **188/189**:203-223.

VANLAUWE B., AIHOU K., AMAN S., TOSSAH B.K., DIELS J., SANGINGA N. et MERCKX R., 2001. Leaf quality of selected hedgerow species at two canopy ages in the derived savanna zone of West Africa. *Agroforestry Systems* **51**:21-30.

WALKLEY A. et BLACK A., 1934. An examination of the Degtjareff method for determining soil organic matter and a proposed modification of the chromic acid titration method. *Soil Science* **37**:29-38.

WILSON T.D., BROOK R.M. et TOMLINSON H.F., 1998. Interactions between *néré (Parkia biglobosa)* and under-planted sorghum in a parkland system in Burkina faso. *Experimental Agriculture* **34**: 85-99

WOODING R.A., 1968. Steady infiltration from a shallow circular pond. *Water Resources Research* **4**:1259-1273.

YOUNG A., 1995. *L'agroforestrie pour la conservation du sol*. CTA ed., Wageningen, Pays Bas, 194 p.

ZOMBOUDRE G., ZOMBRE G., OUEDRAOGO M., GUINKO S. et ROY-MACAULEY H., 2005a. Réponse physiologique et productivité des cultures dans un système agroforestier traditionnel: cas du maïs (*Zea mays* L.) associé au karité (*Vitellaria paradoxa* Gaertn.) dans la zone est du Burkina Faso. *Biotechnologie, Agronomie, Société et Environnement* **9**:75-85.

ZOMBOUDRE G., ZOMBRE G., OUEDRAOGO M., GUINKO S. et ROY-MACAULEY H., 2005b. Productivité du maïs (*Zea mays* L.) associé au karité (*Vitellaria paradoxa* Gaertn.) dans un système agroforestier. *Rev. CAMES-Série A* **3**:19-27.

ANNEXES

Annexe 1 : Fiche technique de la variété du maïs SR 21 (SANOU, 1993)

Dénomination :	Streak Resistant n° 21 (SR 21)
Synonyme :	EV 8421 SR
Origine génétique :	Blanco cristallino
Origine géographique :	Ibadan, Nigéria (IITA)
Type variétal :	Variété composite

Caractères agro-morphologiques :

- Cycle semis-floraison mâle : 59 jours après semis
- Cycle semis-maturité : 95 jours en grain
- Hauteur de la plante : 180 cm
- Hauteur d'insertion de l'épis : 90 cm
- Résistance à la verse : Bonne
- Résistance à la casse : Bonne
- Maladies et ennemis des cultures :
 - Helminthosporiose : Tolérante
 - Rouille : Tolérante
 - Viroses : Résistante
 - Foreurs : non testée
 - Insectes de stock : Test en cours
 - Striga : Test en cours

Caractères du grain :

- Couleur : Blanc
- Texture : Semi-corné

Semis :

- Période : Juin – 15 Juillet, après 20 mm de pluie
- Dose : 20-25 kg/ha à 3 graines/poquet
- Ecartement : 0,80 m entre les lignes et 0,40 m entre les poquets
0,80 m entre les lignes et x 0,30 m entre les poquets
(pour le fourrage)

Densité finale : 62 500 plantes/ha ; 83 333 plantes/ha pour le fourrage

Démariage : démarier à 2 plantes/poquet entre le 15^{ème} et le 20^{ème} jour après semis

Fumure : 200 kg/ha de NPK à appliquer du semis au 15^{ème} jour après semis et
100 kg/ha d'Urée à fractionner en deux et appliquer au 30^{ème} et 40^{ème} JAS.

Rendement : 5,1 t/ha

Utilisation :

- Humaine : Tô, couscous, bouillie, maïs à griller
- Animale : Fourrage, grain
- Industrielle : Semoulerie

Vocation :

- aire de culture : * Pluviométrie $\geq$ à 900 mm
* Périmètres irrigués
- intensification : * Agriculture semi intensive
* Agriculture intensive

Points forts de la variété :

- Résistance au virus de la striure du maïs
- Potentialités de rendement élevées
- Adaptation à l'intensification de la culture

Points faibles de la variété

- Exige de bonnes conditions de culture

Caractéristiques de l'épi

- Longueur moyenne de l'épi : 16,17cm
- Nombre moyen de rangs de grain par épi : 14
- Nombre de grains par rang : 38
- Nombre de grains par épi : 552

Annexe 2 : Caractéristiques morphologiques des arbres dans les parcs à karité et à faidherbia du site d'expérimentation

Parc n°1 à *Vitellaria paradoxa*

N° d'ordre	Diamètre du tronc (cm)	Circonférence du tronc à 1,30m (cm)	Hauteur totale (m)	Diamètre houppier		Surface houppier (m²)
				Nord-Sud	Est-Ouest	
1	56	175,84	11,5	11,5	14,3	129,09
2	46	144,44	11,25	11,9	13,5	126,11
3	48	150,72	10	10,3	10,3	83,28
4	44	138,16	9	8,4	8,2	54,07
5	30	94,2	12,25	8	7,3	45,84
6	32	100,48	9	8,5	7,5	50,04
7	18	56,52	9,25	4,8	4,5	16,96
8	32	100,48	11	7,5	9,6	56,52
9	20	62,8	10	4,5	5,52	19,50
10	16	50,24	8,5	4,6	4,7	16,97
11	32	100,48	10	8,3	8,4	54,73
12	24	75,36	8,5	5,6	5,3	23,30
13	80	251,2	16,5	14,6	17,4	199,42
14	56	175,84	12	10,8	9,6	81,39
15	32	100,48	8,75	5,7	6,5	29,08
16	46	144,44	13,5	10,8	10,2	86,48
17	62	194,68	14,5	10,2	11,7	93,68
18	36	113,04	10	8,2	8,1	52,14
19	16	50,24	6,5	6,4	5,4	27,13

Parc n°2 à *Vitellaria paradoxa*

N° d'ordre	Diamètre du tronc (cm)	Circonférence du tronc à 1,30m (cm)	Hauteur totale (m)	Diamètre houppier		Surface houppier (m²)
				Nord-Sud	Est-Ouest	
1	32	100,48	10	8	8,1	50,87
2	44	138,16	13,95	7,3	7	40,11
3	26	81,64	7,5	7	10	54,95
4	28	87,92	10,5	6,3	6,6	32,64
5	16	50,24	7	6	6	28,26
6	24	75,36	6,5	6,3	6,1	30,17
7	40	125,6	10,5	4,8	6,8	25,62
8	32	100,48	8,5	5,8	7,5	34,15
9	56	175,84	13	9	10,35	73,12
10	34	106,76	9	10,3	12	97,03
11	36	113,04	9,5	10,5	8	65,94
12	34	106,76	10	6,5	7,7	39,29
13	32	100,48	9,5	6,9	8	43,33
14	40	125,6	10	9,2	9,5	68,61
15	22	69,08	9,5	7,3	8	45,84
16	40	125,6	13	9,5	10,5	78,30
17	36	113,04	10,5	9,8	8,8	67,70
18	24	75,36	10	5,5	6,3	27,20
19	42	131,88	12,25	9,3	8,4	61,32
20	24	75,36	11	6,75	6,55	34,71
21	18	56,52	10,5	7,3	6,52	37,36
22	30	94,2	8,5	8,3	5,7	37,14
23	26	81,64	8,75	7,5	7,2	42,39

Parc n°3 à *Faidherbia albida*

N° d'ordre	Diamètre du tronc (cm)	Circonférence du tronc à 1,30m (cm)	Hauteur totale (m)	Diamètre houppier		Surface houppier (m²)
				Nord-Sud	Est-Ouest	
1	18	56,52	12	10,5	7,85	64,70
2	16	50,24	6,7	9,55	10,4	77,97
3	64	200,96	17,5	3,5	4,1	11,26
4	32	100,48	12	5	5,4	21,20
5	42	131,88	17	18,9	23,3	345,69
6	32	100,48	11	6,13	8	38,50
7	24	75,36	12,5	4,56	6,08	21,76
8	26	81,64	8,5	6,73	9,25	48,87
9	24	75,36	9,6	6,6	6,6	34,19
10	20	62,8	10,75	8,6	6,37	43,00
11	30	94,2	11,5	7,5	7,68	45,22
12	28	87,92	11	4,5	9	31,79
13	32	100,48	12,5	4,5	6,4	22,61
14	32	100,48	9	7,4	8	46,47
15	20	62,8	9,5	4,35	4,3	14,68
16	28	87,92	16	4,8	4,83	18,20
17	32	100,48	12,75	9,52	7,93	59,26
18	6	18,84	3,5	7	5	27,48
19	20	62,8	8,3	5,45	4,38	18,74
20	40	125,6	16,25	10,6	10,45	86,95
21	24	75,36	10	11	9,9	85,49
22	32	100,48	10,7	4,5	4	14,13
23	24	75,36	8,3	4,5	5,7	20,14
24	40	125,6	11	2,22	1,8	3,14
25	26	81,64	10,5	5,4	4,87	20,64
26	16	50,24	8,7	8,45	13,45	89,22
27	48	150,72	13	3,73	3,5	10,25
28	24	75,36	11	6,2	8,43	41,03
29	24	75,36	12,6	4,7	4	14,76
30	32	100,48	20	4,1	3,4	10,94
31	20	62,8	8,95	4,5	4,6	16,25
32	32	100,48	14,1	5,75	7,55	34,08
33	30	94,2	14	4,6	4,52	16,32
34	18	56,52	8,5	4,3	3,95	13,33
35	26	81,64	11	4,37	5,3	18,18
36	24	75,36	9,97	3,6	4,65	13,14
37	28	87,92	12	5,7	14,3	63,99
38	28	87,92	11	7,3	7,15	40,97
39	6	18,84	4	1,2	1,24	1,17
40	14	43,96	7,6	1,21	1,15	1,09
41	6	18,84	5	3,6	3,5	9,89

Parc n°4 à *Faidherbia albida*

N° d'ordre	Diamètre du tronc (cm)	Circonférence du tronc à 1,30m (cm)	Hauteur totale (m)	Diamètre houppier		Surface houppier (m²)
				Nord-Sud	Est-Ouest	
1	88	276,32	19,5	20	16,6	260,62
2	80	251,2	19	17,8	13,6	190,03
3	72	226,08	21	13,4	11,5	120,97
4	94	295,16	21,5	15,3	16,2	194,57
5	74	232,36	18	22	24,5	423,12
6	90	282,6	16	13	15,5	158,18
7	64	200,96	16	9,2	2,5	18,06
8	72	226,08	22	14	10,2	112,10
9	80	251,2	22	10,5	11,8	97,26
10	108	339,12	21	13,6	10	106,76
11	72	226,08	16,6	3	9	21,20
12	72	226,08	19	8,2	14	90,12
13	58	182,12	21,5	13,2	14	145,07
14	72	226,08	20	14	14	153,86
15	64	200,96	17	8,7	14,7	100,39
16	40	125,6	13,5	22,5	21,5	379,74
17	92	288,88	13	12	12	113,04
18	64	200,96	17,5	10,2	9,5	76,07
19	72	226,08	15,5	15,2	12,5	149,15
20	56	175,84	15,5	14,7	14,4	166,17

Annexe 3 : Programmation de la centrale d'acquisition (CR 10X) de la station météo de Dossi, Burkina Faso

```
;{CR10X}
;Program for Logger System no 2 to Burkina Faso
;Customer: INERA Burkina Faso
;In Situ Bengt Noren 040505

;Measurement and data storage for 4xCS616 TDR probes is activated by
connecting C1 to 5V
;on the logger Wiring Panel
;If the TDR sensors are installed this connection must be done, otherwise
no measurements are performed!!!!
;The TDR data are stored as four extra values in the output record,
directly after the precipitation value.

*Table 1 Program
01: 60          Execution Interval (seconds)

1:  Set Port(s) (P20)
1:  9999      C8..C5 = nc/nc/nc/nc
2:  1999      C4..C1 = high/nc/nc/nc

;Activate HygroClip transducer
;Measurements are performed last in measurement section of program to allow
for signal
;stabilization

;-----Measurement Section-----

2:  Batt Voltage (P10)
1:  1          Loc [ Battery  ]

3:  Internal Temperature (P17)
1:  2          Loc [ T_logger  ]

4:  Temp (107) (P11)
1:  1          Reps
2:  5          SE Channel
3:  1          Excite all reps w/E1
4:  6          Loc [ T1        ]
5:  1.0        Mult
6:  0.0        Offset

5:  Volt (Diff) (P2)
1:  1          Reps
2:  2          7.5 mV Slow Range
3:  4          DIFF Channel
4:  7          Loc [ Q1        ]
5:  361.8      Mult
6:  0.0        Offset
;Sno. Q32659
```

```

6: Pulse (P3)
  1: 1      Reps
  2: 1      Pulse Channel 1
  3: 2      Switch Closure, All Counts
  4: 8      Loc [ Prec      ]
  5: 0.202  Mult
  6: 0.0    Offset
;Sno:040506

7: Pulse (P3)
  1: 1      Reps
  2: 2      Pulse Channel 2
  3: 22     Switch Closure, Output Hz
  4: 9      Loc [ WS      ]
  5: .75    Mult
  6: .2     Offset

8: If Flag/Port (P91)
  1: 41     Do if Port 1 is High
  2: 30     Then Do

9: If time is (P92)
  1: 0      Minutes (Seconds --) into a
  2: 30     Interval (same units as above)
  3: 30     Then Do

10: CS616 Water Content Reflectometer (P138)
  1: 4      Reps
  2: 9      SE Channel
  3: 5      C5 is first of sequential Control Ports used
  4: 10     Loc [ VWC_1    ]
  5: 1.0    Mult
  6: 0.0    Offset
;Volumetric Water Content. 4x CS616
;Performed only if Port 1 is connected to 5V, and only once every half
hour.

11: End (P95)
;end if time

12: End (P95)
;end if flag

13: Excitation with Delay (P22)
  1: 2      Ex Channel
  2: 300    Delay W/Ex (0.01 sec units)
  3: 0000   Delay After Ex (0.01 sec units)
  4: 0000   mV Excitation
;extra 3s delay from power on before measuring T/RH probe

14: Volt (Diff) (P2)
  1: 1      Reps
  2: 5      2500 mV Slow Range
  3: 1      DIFF Channel
  4: 3      Loc [ TA      ]
  5: 0.1    Mult
  6: -40.0  Offset

```

```

15: Volt (Diff) (P2)
  1: 1      Reps
  2: 5      2500 mV Slow Range
  3: 2      DIFF Channel
  4: 4      Loc [ RH      ]
  5: 0.1    Mult
  6: 0.0    Offset

16: Saturation Vapor Pressure (P56)
  1: 3      Temperature Loc [ TA      ]
  2: 14     Loc [ SVP      ]

VP=RH*SVP/100

17: Set Port(s) (P20)
  1: 9999    C8..C5 = nc/nc/nc/nc
  2: 0999    C4..C1 = low/nc/nc/nc
;Disconnect power from probe

;-----Output section-----

18: If time is (P92)
  1: 0      Minutes (Seconds --) into a
  2: 30     Interval (same units as above)
  3: 10     Set Output Flag High (Flag 0)

19: Set Active Storage Area (P80)^18662
  1: 1      Final Storage Area 1
  2: 002    Array ID
;Array id = 2 for system #2

20: Real Time (P77)^19758
  1: 1220   Year,Day,Hour/Minute (midnight = 2400)

21: Average (P71)^31340
  1: 1      Reps
  2: 1      Loc [ Battery  ]

22: Average (P71)^10699
  1: 1      Reps
  2: 2      Loc [ T_logger ]

23: Average (P71)^7536
  1: 1      Reps
  2: 3      Loc [ TA      ]

24: Average (P71)^29742
  1: 1      Reps
  2: 4      Loc [ RH      ]

25: Average (P71)^26923

```

```

1: 1      Reps
2: 5      Loc [ VP      ]

26: Average (P71)^29124
1: 1      Reps
2: 6      Loc [ T1      ]

27: Average (P71)^10074
1: 1      Reps
2: 7      Loc [ Q1      ]

28: Totalize (P72)^1621
1: 1      Reps
2: 8      Loc [ Prec     ]

29: Average (P71)^14732
1: 1      Reps
2: 9      Loc [ WS      ]

30: If Flag/Port (P91)
1: 41     Do if Port 1 is High
2: 30     Then Do

31: Average (P71)^14007
1: 4      Reps
2: 10     Loc [ VWC_1    ]

32: End (P95)

*Table 2 Program
02: 0.0000 Execution Interval (seconds)

```

*Table 3 Subroutines

End Program

-Input Locations-

1 Battery	1	1	1
2 T_logger	1	1	1
3 TA	1	2	1
4 RH	1	1	1
5 VP	1	1	0
6 T1	1	1	1
7 Q1	1	0	1
8 Prec	1	1	1
9 WS	1	1	1
10 VWC_1	5	1	1
11 VWC_2	9	1	1
12 VWC_3	9	1	1
13 VWC_4	17	1	1
14 SVP	1	0	1
15 TA_del	1	0	0
16 RH_del	1	0	0
17 CSI_R	0	0	0
18 CSI_1	0	0	0
19 _____	0	0	0
20 _____	0	0	0
21 _____	0	0	0
22 _____	0	0	0

```

23 _____ 0 0 0
24 _____ 0 0 0
25 _____ 0 0 0
26 _____ 0 0 0
27 _____ 0 0 0
28 _____ 0 0 0
29 _____ 0 0 0
30 _____ 0 0 0
31 _____ 0 0 0
-Program Security-
0000
0000
0000
-Mode 4-
-Final Storage Area 2-
0
-CR10X ID-
0
-CR10X Power Up-
3
-CR10X Compile Setting-
3
-CR10X RS-232 Setting-
-1
-DLD File Labels-
0
-Final Storage Labels-
0,Battery_AVG~1,31340
1,T_logger_AVG~2,10699
2,TA_AVG~3,7536
3,RH_AVG~4,29742
4,VP_AVG~5,26923
5,T1_AVG~6,29124
6,Q1_AVG~7,10074
7,Prec_TOT~8,1621
8,VWC_1_AVG~10,14007
8,VWC_2_AVG~11
8,VWC_3_AVG~12
8,VWC_4_AVG~13
9,2,18662
10,Year_RTM,19758
10,Day_RTM
10,Hour_Minute_RTM
11,WS_AVG~9,14732

```

Annexe 4 : Description de l'instruction 138

*Table 1 Program

01: 1 Execution Interval (seconds)

1: If Flag/Port (P91)

1: 11 Do if Flag 1 is High

2: 30 Then Do

2: CS616 Water Content Reflectometer(P138)

1: 1 Reps

2: 1 SE Channel

3: 1 C1 is first of sequential Control Ports used

4: 2 Loc [periode]

5: 1.0 Mult

6: 0.0 Offset

3: Polynomial (P55)

1: 1 Reps

2: 1 X Loc [periode]

3: 3 F(X) Loc [TVE]

4: -0.0063 C0

5: -0.0063 C1

6: 0.0007 C2

7: 0.0 C3

8: 0.0 C4

9: 0.0 C5

4: Do (P86)

1:21 Set Flag 1 Low

5: End (P95)

*Table 2 Program

02: 0.0000 Execution Interval (seconds)

*Table 3 Subroutines

End Program

-Input Locations-

1 periode 1 0 1

2 TVE 1 0 1

Annexe 5 : Valeur de la constante α pour différentes textures du sol (MAHIEU ET PIELTAIN, 1998)

Type de sol		Valeur de α (m ⁻¹)
Sable fin	Humectation	30,52
Sable limoneux	Humectation	50 et 92
Sable limoneux fin	Humectation	4 et 13
Limons fins et limons argileux	Humectation	2
Sableux	Drainage	10 à 20
Limoneux	Drainage	1 à 2
Argileux	Drainage	0,1 à 0,2

Annexe 6 : Publications scientifiques

PUBLICATION N° 1

ZOMBOUDRE G., ZOMBRE G., OUEDRAOGO M., GUINKO S. et ROY-MACAULEY H., 2005. Réponse physiologique et productivité des cultures dans un système agroforestier traditionnel: cas du maïs (*Zea mays* L.) associé au karité (*Vitellaria paradoxa* Gaertn.) dans la zone est du Burkina Faso. *Biotechnologie, Agronomie, Société et Environnement* **9**:75-85.

Réponse physiologique et productivité des cultures dans un système agroforestier traditionnel : cas du maïs (*Zea mays* L.) associé au karité (*Vitellaria paradoxa* Gaertn.) dans la zone est du Burkina Faso

George Zomboudré ⁽¹⁾, Gérard Zombré ⁽¹⁾, Makido Ouedraogo ⁽¹⁾, Sita Guinko ⁽¹⁾, Harold Roy macauley ⁽²⁾

⁽¹⁾ Université de Ouagadougou, UFR/SVT, 03 B.P. 7021 Ouagadougou 03 (Burkina Faso).

E-mail : g.zombre@univ-ouaga.bf

⁽²⁾ CERAAS (Centre d'Étude régional pour l'Amélioration de l'Adaptation à la Sécheresse), Thiès Escale (Sénégal).

Reçu le 9 juin 2004, accepté le 18 janvier 2005.

Le comportement d'une culture de maïs en situation de contrainte hydrique dans un parc à karité a été étudié. Trois zones de la surface sous influence de l'ombrage de chacune des deux formes de houppier de ce parc (boule et balai) ont été comparées à la zone située hors houppier. La teneur en eau et le potentiel hydrique du sol, le potentiel hydrique foliaire, la croissance et la productivité du maïs ont été évalués dans ces zones. Les précipitations sont plus élevées sous le houppier en balai que sous le houppier en boule. La teneur pondérale en eau du sol s'est révélée par contre plus élevée sous le houppier en boule aussi bien en août qu'en septembre, à cause de l'importance de l'ombrage contribuant à réduire la transpiration des cultures sous-jacentes et l'évaporation du sol. L'effet ombrage est plus excessif au voisinage des houppiers en boule que sous et près des houppiers en balai. Les variations du potentiel matriciel de l'eau du sol ont été plus accentuées pour les sols situés sous houppier en balai et hors houppier. En période de maturation, le potentiel hydrique du maïs tend à être plus élevé sous les houppiers avant-midi et plus faible entre midi et l'après-midi en dehors du houppier. Le stress hydrique est plus important en mi-journée. La mesure du taux d'assimilation chlorophyllienne a donné des valeurs élevées dans les zones hors houppier et des valeurs faibles sous le houppier. Le rendement en grain et en épis ainsi que la biomasse de tige ont été relativement plus élevés sous le houppier en balai que sous le houppier en boule. La production a été cependant moins importante sous le houppier que hors du houppier.

Mots-clés. Karité, *Zea mays*, sécheresse, interaction arbre-culture, croissance, productivité, Burkina Faso.

Physiological answer and productivity of the cultures in a traditional agroforestry system: the case of maize (*Zea mays* L.) associated with the shea tree (*Vitellaria paradoxa* Gaertn.) in the east zone of Burkina Faso. This study was focused on the behaviour of maize cultivated in a forest park of shea butter tree. The surfaces under the influence of shading of the two forms of canopy of this species, termed ball and brush, were compared with the zone located outside the shade of the canopy. Soil water content, growth and productivity of maize were evaluated in these zones. Rainfall was higher under the brush canopy than under the ball canopy. The soil water content appeared to be higher under the ball canopy than the brush canopy in August and September, because of the importance of the shading due to the ball canopy, which contributes to reduce transpiration of the crop and evaporation of water from the soil. Soil water matrix potential variation was higher both under the brush canopy and outside the shade of the canopy. Grain and ear yield as well as stem biomass were relatively higher under the brush canopy than the ball canopy. However they were lower under than outside the canopy.

Keywords. Shea butter tree, *Zea mays*, interaction tree-crop, growth, productivity, Burkina Faso.

1. INTRODUCTION

Au Burkina Faso, l'agriculture est largement dominée par les cultures pluviales dont les plus importantes en production restent le sorgho, le mil et le maïs. Selon les estimations de la FAO (2000), près de 2,9 millions d'hectares sont mis en culture chaque année au Burkina. Le maïs occupe 8 à 9 % de cette superficie et représente 14 % de la production nationale.

Jadis effectuée autour des cases où elle bénéficie de la matière organique provenant des ordures ménagères et des déjections du petit bétail, la culture du maïs est pratiquée actuellement en plein champ. Dans ce milieu de production, où il n'y a pratiquement pas d'apport de fertilisation, les systèmes agricoles sont demeurés de type traditionnel et itinérant, basés sur l'exploitation des ressources naturelles (Somé, 1989).

Cette agriculture itinérante, très consommatrice d'espace, évolue également dans un contexte de climat très défavorable, caractérisé par l'insuffisance et la mauvaise répartition spatio-temporelle des pluies. De nos jours, avec la persistance de la sécheresse, les rendements des cultures et particulièrement ceux du maïs ont tendance à plafonner et dépassent rarement 0,7 à 1 tonne/ha en milieu paysan (Hema, 1994). Pour améliorer la productivité des zones agricoles à risque et assurer une certaine stabilité de la production, il est nécessaire de promouvoir au niveau du paysan, d'une part l'utilisation et la maîtrise des facteurs de production et d'autre part, une gestion raisonnée des ressources disponibles. Si l'application des engrais minéraux permet d'obtenir de meilleurs rendements, leur coût élevé demeure cependant un facteur limitant leur utilisation. Une alternative, peu coûteuse et plus accessible aux producteurs, reste l'utilisation de technologies à travers un recyclage approprié de la biomasse produite par les composantes des systèmes agroforestiers, en l'occurrence l'association arbre-plante cultivée. La présence des arbres au milieu des cultures crée des paysages appelés parcs ou "paysages agrosylvicoles".

Il s'agit d'un système traditionnel d'utilisation des terres qui associe l'arbre et les cultures dans un arrangement spatial aléatoire (Sinclair, 1999 ; Boffa, 2000). L'avantage de l'intégration de l'arbre dans les systèmes de production a été souligné par plusieurs auteurs (Maiga, 1987 ; Nyberg, Högborg, 1995 ; Boffa, 1995 ; Jonsson *et al.*, 1999).

Par contre, les effets de l'arbre sur les cultures en association semblent contradictoires.

Dans la zone d'influence de l'arbre, les rendements des cultures sont tantôt meilleurs (Young, 1986 ; Diakite, 1995) et tantôt réduits (Maiga, 1987 ; Kessler, 1992 ; Boffa, 1995). Dans ce dernier cas, la compétition entre l'arbre et la culture pour l'utilisation

de l'eau et de la lumière a été souvent mise en cause. La compétition pour l'eau se manifeste généralement en début de saison, lorsqu'une partie des pluies, encore légères, est interceptée par le houppier. La quantité d'eau qui atteint le sol situé sous houppier peut s'avérer insuffisante du fait qu'ensemble, l'arbre et la culture sous-jacente, absorbent plus d'eau que la composante culturale unique (Boffa, 2000).

Dans les zones à pluviométrie irrégulière, cette insuffisance d'eau sous le couvert des arbres peut persister une bonne partie de la saison des pluies. Mais, à mesure que la saison avance, les sites arborés tendent à devenir plus humides que les zones découvertes à cause de l'effet d'ombrage (Jonsson, 1995 ; Boffa, 2000). Cette humidité accrue des sites arborés en milieu de saison ne semble pas se justifier totalement (Diakite, 1995). En cas de sécheresse, les horizons superficiels du sol sous le couvert arboré s'assèchent progressivement et de manière uniforme (Boffa, 2000). Ainsi, au cours d'une saison de végétation, l'alimentation en eau des cultures dans un site arboré sera bonne ou déficitaire selon l'importance et la distribution des précipitations.

Le présent travail a pour but de mieux comprendre le comportement d'une culture de maïs dans une formation végétale en mesurant, dans cette formation végétale, la teneur en eau et les caractéristiques physico-chimiques du sol et la productivité selon le port de l'arbre dans la zone d'influence de l'ombrage du houppier.

2. MATÉRIEL ET MÉTHODES

2.1. Le site de l'étude

La formation végétale étudiée est un parc à karité. Elle couvre une superficie de 1 ha et est localisée à l'intérieur de la station de recherches agricoles du village de Kouaré dans la province du Gouma. La station de Kouaré est située à 305 m d'altitude et s'inscrit en latitude entre 12°5'N et 11°55'S et en longitude entre 0°10' et 0°25'W. Le climat de la zone d'étude est de type nord-soudanien et comprend deux saisons principales : une saison sèche qui s'étale sur six à sept mois (juin à octobre) et une saison pluvieuse qui dure cinq à six mois avec une pluviométrie moyenne en année normale variant de 850 mm à 1050 mm et en année de sécheresse entre 550 mm et 850 mm. La distribution des pluies est de nature unimodale (Sivakumar, Gnoumou, 1987).

Les sols de la zone d'étude sont de type ferrugineux tropical lessivé induré peu profond (INERA, 1993). La granulométrie est dominée par le limon en surface (52 %) et en profondeur (33 %). Les fractions de sable et d'argile sont respectivement de 27 % et 21 % en surface et de 50,5 % et 16,6 % en

profondeur. Le sol présente une carence moyenne en potassium (1639 ppm) et en phosphore (302 ppm).

Le matériel végétal est composé des pieds de karité en boule et en balai (Figures 1a, b) et d'une variété de maïs de 90 jours de cycle, communément appelée KPB (Kamboinsé Précoce Blanc).

2.2. Mise en place de la culture

Les travaux de terrain ont consisté à réaliser un labour à plat suivi du hersage au tracteur dès le début du mois de juillet, date à laquelle les premières pluies sont tombées. Les semis se sont déroulés dans le même mois (11 et 12 juillet) à des écartements de 0,40 m entre les poquets et 0,80 m entre les lignes.

Le démaillage à deux plants par poquet a été réalisé quinze jours après le semis. Deux sarclages ont été effectués, le premier au moment du démaillage et le second 15 jours plus tard. La récolte est intervenue dans la première quinzaine du mois d'octobre.

a. Balai



b. Boule



Figure 1. Pieds de karité. Houppier en balai (a) et en boule (b) — *Shea butter trees. Brush canopy (a) and ball canopy (b).*

2.3. Le dispositif expérimental

La surface sous étude est un parc à karité. Un inventaire suivi de mensurations des arbres présents a été réalisé avant le démarrage de la campagne. Les résultats de cet inventaire ont permis d'opérer un choix au hasard de huit pieds de karité dispersés à l'intérieur du parc et suffisamment distants les uns des autres de façon à ce que l'ombre projetée des houppiers ne se recoupe pas. Les huit pieds de karité étaient composés de quatre pieds avec un port en boule et de quatre autres avec un port en balai. Parmi les deux ports, chaque pied a été considéré comme une répétition, et fait partie d'une parcelle dont le centre est le point central de la projection verticale du houppier au sol. Dans chacune des parcelles, quatre zones d'interaction arbre-culture représentées par des placettes, ont été délimitées de part et d'autre des arbres, sur les axes est-ouest et nord-sud passant par le centre de la projection du houppier et à des distances qui étaient fonction du rayon (R) de cette projection (Figure 2). Les zones d'interaction sont les suivantes :

- Z1 : zone hors houppier (culture en permanence au soleil) ;
- Z2 : zone sous houppier (culture en permanence à l'ombre) ;
- Z3 : zone intermédiaire 1 (culture au soleil le matin et à l'ombre dans l'après-midi) ;
- Z4 : zone intermédiaire 2 (culture à l'ombre le matin et au soleil dans l'après-midi).

Pour une meilleure influence de l'ombrage du houppier sur la culture, ces distances ont été ramenées à $R/2$ pour la zone Z2 et à $2R$ pour les zones Z1, Z3 et Z4.

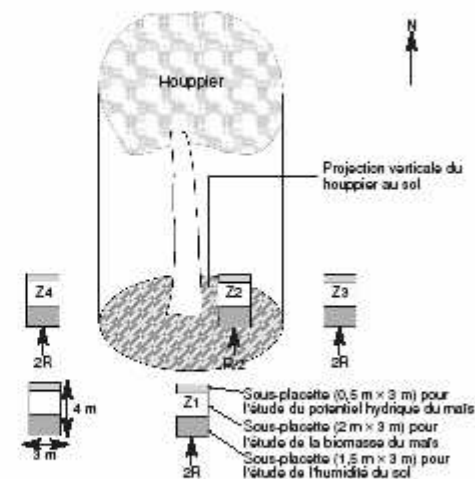


Figure 2. Dispositif expérimental — *Experimental device.*

Chaque placette, de 4 m × 3 m, a été divisée en trois sous-placettes : une sous-placette centrale, de 2 m × 3 m, pour la mesure de la biomasse aérienne du maïs et deux sous-placettes latérales, l'une de 0,5 m × 3 m, utilisée pour déterminer le potentiel hydrique du maïs et l'autre, de 1,5 × 3 m, pour l'étude de l'humidité du sol. La position de l'une et l'autre des sous-placettes latérales par rapport à la sous-placette centrale a été déterminée au hasard.

3. LES MÉTHODES DE MESURES

Les mesures morphologiques prises sur les karités de la zone étudiée comprennent : la circonférence du tronc, prise à 1,30 m de hauteur ou à hauteur de poitrine à l'aide d'un mètre ruban ; la hauteur totale, la hauteur du fût et la hauteur du houppier, mesurées avec une perche télescopique ; le diamètre du houppier mesuré avec un ruban de 30 m. La forme du houppier a été déterminée par observation visuelle et en se référant aux trois catégories de port (boule, balai et parasol) (Ruyssen, 1957).

Le volume du houppier (V) a été calculé à partir de deux formules (Rondeux, 1993) suivant la forme architecturale du houppier :

– port en boule et fuseau¹

$$V = 4/3 \pi \times (\text{diamètre}_{\text{est-ouest}}/2 \times (\text{diamètre}_{\text{nord-sud}}/2 \times (\text{hauteur du houppier})/2$$

– port en parasol

$$V = \pi/10 \times (\text{diamètre}_{\text{est-ouest}}) \times (\text{diamètre}_{\text{nord-sud}}) \times (\text{hauteur du houppier})$$

Les précipitations sous houppier et hors houppier ont été mesurées à l'aide de pluviomètres. L'évolution de l'humidité du sol a été suivie par la méthode directe de gravimétrie et par tensiométrie. La méthode tensiométrique renseigne sur l'état du potentiel hydrique du sol. Pour la présente étude, les tensiomètres ont été installés dans le sol à 30 cm de profondeur. Les lectures de potentiel ont été effectuées tous les matins pour éliminer les effets thermiques.

Le potentiel hydrique foliaire du maïs est déterminé pendant les périodes d'arrêt des pluies et en conditions ensoleillées. Les mesures ont été effectuées à l'aide d'une chambre à pression (modèle 1400 SKPM, Instrument Co, Ltd, UK).

La teneur en eau des plantes a été déterminée à partir des échantillons de feuilles séchées à l'étuve à 85 °C pendant 24 heures. La formule suivante a été ensuite utilisée pour estimer la teneur en eau :

$$TE \% = [(PF - PS)/PF] \times 100$$

avec

TE = teneur pondérale en eau

PF = poids frais de l'échantillon

PS = poids sec de l'échantillon.

Le taux d'assimilation chlorophyllienne a été mesuré sur des disques foliaires prélevés à l'aide d'un emporte-pièce le matin avant le lever du soleil (5 heures) et le soir après le coucher du soleil (18 heures) sur la 3^e feuille à partir du sommet de la tige (Ouedraogo, 2000).

Le taux d'assimilation exprimé en µg/mm²/heure a été calculé selon la formule suivante :

$$TA = (PS.s - PS.m)/SDF/D$$

avec :

TA = taux d'assimilation

PS.s = poids sec du soir

PS.m = poids sec du matin

SDF = surface disque foliaire

D = durée d'insolation du jour de mesure.

Le potentiel hydrique foliaire du maïs est déterminé pendant les périodes d'arrêt des pluies et en conditions ensoleillées. Les mesures ont été effectuées à l'aide d'une chambre à pression (modèle 1400 SKPM, Instrument Co, Ltd, UK). Les mesures de la hauteur des plants et le comptage du nombre de feuilles apparentes ont été effectués par décade sur cinq pieds de maïs pris au hasard dans chaque placette. À la fin du cycle et dans chacune des sous-placettes de 2 × 3 m du dispositif expérimental, les variables telles que le nombre d'épis, le poids des épis, le poids des tiges, le poids des grains et le poids de 1000 grains ont été mesurées. Les données collectées ont été soumises à une analyse de variance (ANOVA) à l'aide du logiciel STATITCF version 5. Les moyennes ont été comparées par le test de Newman et Keuls au seuil de 5 % (niveau de probabilité retenu pour parler d'effet significatif).

4. RÉSULTATS

La formation végétale de l'aire étudiée est dominée par le karité. Elle couvre une superficie de 1 ha avec un effectif de 33 pieds de karité. En terme d'agriculture, ce peuplement peut présenter une forte densité. Les arbres voisins et distants de moins de 5 m représentaient 42 % des pieds et leur houppier était presque fusionné. Sur l'aire d'étude, 58 % des arbres étaient suffisamment dispersés et l'espacement entre deux arbres voisins variait de 15 à 20 m.

Le port du houppier est du type balai chez 60 % des karités avec un volume du houppier compris entre

¹ Port en fuseau est équivalent à port en balai d'où même formule de volume.

26 et 116 m³. Parmi les karités à port en boule, seulement 30 % des pieds ont un volume de houppier compris entre 200 et 500 m³. Ce peuplement pourrait être jeune car la totalité des karités présente un houppier de faible volume (inférieur à 500 m³) (Diakite, 1995). Les caractéristiques des huit sujets retenus pour la présente étude sont regroupées dans le tableau 1. La figure 3 présente les hauteurs de pluies reçues au sol sous houppier en balai entre juillet et octobre, nettement plus élevées que celles reçues hors houppier et sous houppier en boule. Sous houppier en boule, les pluies reçues au sol ont même été plus faibles qu'en zone découverte. Entre juillet et octobre,

le cumul pluviométrique a été de 524,7 mm sous houppier en balai, 420,5 mm sous houppier en boule et 475,8 mm hors houppier. Comparativement à la pluviométrie hors houppier, on note une réduction moyenne de 12 % des pluies sous houppier en boule et un excédent moyen de 10,3 % sous houppier en balai. Du point de vue répartition, la figure 3 indique également que les pluies ont été mal réparties entre juillet et octobre. Elles ont été abondantes entre la mi-juillet et août et se sont un peu raréfiées en septembre et en octobre.

La teneur moyenne en eau du sol évaluée en août, du 40^e au 50^e jour après le semis (JAS), à 30 cm de profondeur, a été de 12 % pour les sols situés sous houppier en boule, de 11,2 % pour les sols situés sous houppier en balai et enfin de 10,6 % pour les sols hors houppier. L'évaluation réalisée du 60^e au 70^e JAS, en septembre, lorsque la pluviosité a diminué, montre que la teneur en eau du sol a été de 10,7 % sous houppier en boule, de 8,86 % sous houppier en balai et de 7,5 % hors houppier (Figure 4). La teneur en eau du sol a moins varié sous le houppier en boule entre août et septembre et cela s'est également manifesté au niveau de la tension de l'eau dont les valeurs sont restées élevées pendant cette même période.

L'évolution des tensions à 30 cm de profondeur (Figure 5) montre que les variations ont été plus accentuées pour les sols situés sous le houppier en balai et hors houppier. En effet avant une pluie, les valeurs extrêmes du potentiel pour ces sols descendent souvent en dessous de -30 KPa. Cependant, pour les sols situés sous le houppier en boule, les tensions oscillent autour de -20 KPa. Ceci montre bien que le sol sous le houppier en boule est toujours plus humide que les sols hors houppier et sous houppier en balai. Si

Tableau 1. Caractéristiques morphologiques des arbres choisis pour l'étude — *Morphological characteristics of the chosen trees for the study.*

Arbre	Circ. du tronc à 1m30 (cm)	Houppier diamètre (m)	surface au sol (m ²)	hauteur (m)	volume (m ³)
Houppier en boule					
1	108	9,7	74	4,2	203
3	157	9,6	73	5,9	289
4	132	10,4	85	5,6	313
8	177	9,4	70	6,4	298
Houppier en balai					
2	108	8,1	53	4,5	96
5	120	7,6	45	6,0	108
6	120	7,4	44	7,0	123
7	124	8,3	54	5,4	116
Moyenne	132	8,8	62	5,6	193

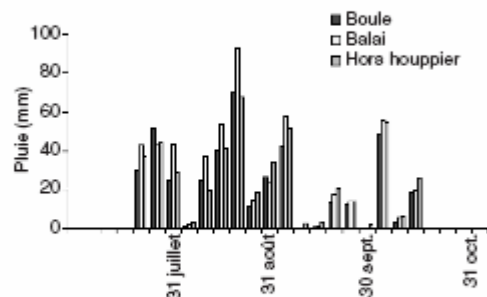


Figure 3. Variation des précipitations moyennes pentadaires (mm) relevées pendant l'expérimentation sous houppier (boule et balai) et hors houppier — *Variation of average rainfall (mm) raised during the experimentation under the shade of the canopy (ball and brush) and outside the shade of canopy.*

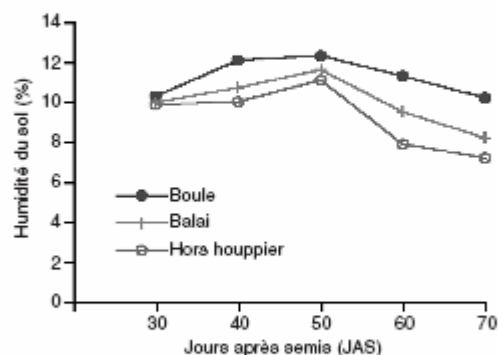


Figure 4. Teneur en eau (%) du sol sous houppier (boule et balai) et hors houppier — *Soil water content (%) under the canopy (ball and brush) and outside of the canopy.*

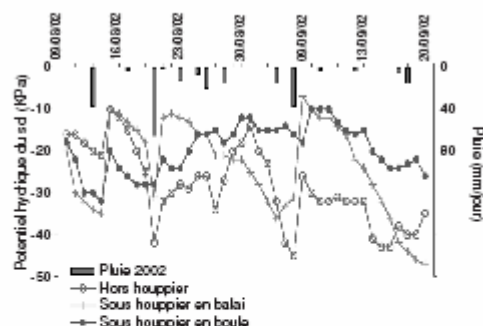


Figure 5. Évolution des tensions de l'eau (KPa) du sol à 30 cm de profondeur sous houppier (boule et balai) et hors houppier — Evolution of the soil water matrix potential (KPa) at 30 cm depth under the canopy (ball and brush) and outside the shade of the canopy.

l'humidité du sol varie très peu sous le houppier en boule, cela s'explique en partie par l'importance de l'ombrage qui contribue à réduire la transpiration des cultures sous-jacentes et l'évaporation du sol. La figure 5 montre également que le potentiel hydrique des sols situés sous le houppier en balai ne remonte à des valeurs élevées (-10 KPa) qu'après une pluie supérieure ou égale à 40 mm. Ce potentiel est rarement atteint au niveau des sols situés hors houppier en raison de l'importance de l'évaporation du sol et de la transpiration des cultures provoquée par le rayonnement et le vent.

Les figures 6 et 7 présentent la hauteur des plants de maïs et le nombre de feuilles mesurés par décade et dans les zones d'interaction suivant le type de houppier. Les hauteurs des plants à maturité ne diffèrent pas significativement entre les deux formes de houppier. Par contre, elles ont été significativement plus élevées en dehors des houppiers ($P = 0,0055$) que sous les houppiers. La hauteur des plants à maturité était en moyenne de 189 cm hors houppier, de 162 cm sous le houppier en balai et de 143 cm sous le houppier en boule. La différence des hauteurs constatée sous houppier et hors houppier montre bien que le maïs est une plante qui a besoin de lumière pour mieux assurer sa croissance. En ce qui concerne la variable nombre de feuilles, elle a été significativement plus élevée hors houppier ($P = 0,0019$) que sous houppier. Les différences en nombre de feuilles par plante sont également significatives ($P = 0,04$) entre le houppier en boule et le houppier en balai. Le nombre moyen de feuilles par plante à 60 JAS a été de 12 dans la zone hors houppier, de 11 sous le houppier en balai et de 10 sous le houppier en boule. L'excès d'ombrage sous le houppier en boule explique en

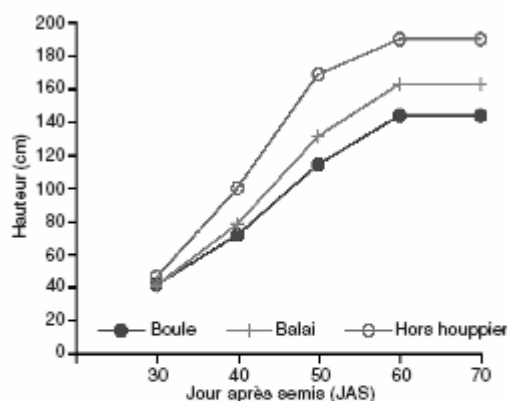


Figure 6. Évolution de la hauteur (cm) des plants de maïs sous houppier (boule et balai) et hors houppier — Evolution of the height (cm) of the maize seedlings under the canopy (ball and brush) and outside the shade of the canopy.

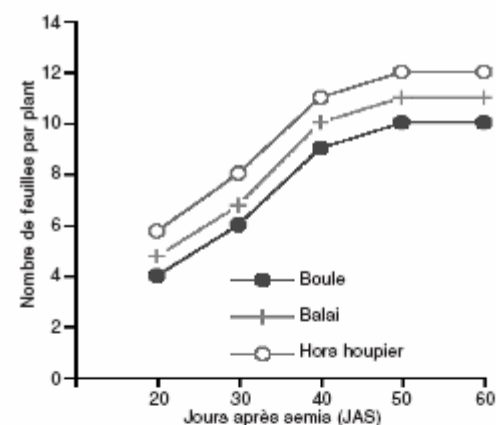


Figure 7. Évolution du nombre de feuilles formées au cours de la croissance du maïs sous houppier (boule et balai) et hors houppier — Evolution of the number of leaves formed during the growth of maize under the canopy (ball and brush) and outside the shade of the canopy.

partie ces résultats. Le potentiel hydrique du maïs a été évalué au cours de deux périodes de végétation (floraison et maturation) marquées par des arrêts momentanés des pluies. Au moment de la floraison intervenue entre le 40^e et le 50^e JAS, l'arrêt des pluies a duré cinq jours, (du 21 au 25 août). À la maturation intervenue entre le 60^e et le 70^e JAS, cet arrêt des pluies a été de sept jours.

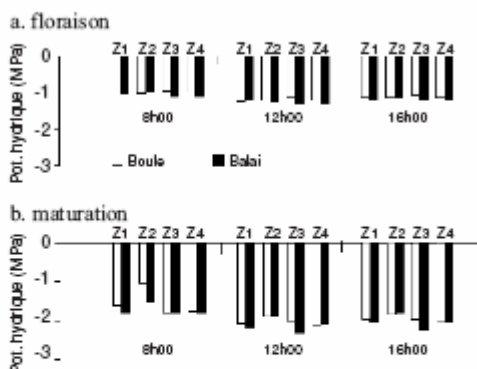
Le potentiel hydrique foliaire du maïs ne varie pas significativement en fonction du type de houppier ou en fonction de la zone d'interaction. En période de floraison (Figure 8a), le potentiel hydrique est assez élevé le matin (8h00) dans les zones d'interaction avec houppier en boule (-0,989 MPa), il diminue à 12h00 (-1,2 MPa) et retrouve le soir (16h00) des valeurs qui sont légèrement inférieures à celles du matin (-1,04 MPa). Cette variation du potentiel hydrique foliaire au cours de la journée n'est pas statistiquement significative.

Le comportement du potentiel hydrique foliaire a été légèrement différent en période de maturation (Figure 8b). Les valeurs les plus élevées ont été observées dans les zones Z2 situées sous les houppiers le matin. Sous le houppier en boule le matin (8h00), le potentiel hydrique a été de -1,04 MPa contre -1,5 MPa sous le houppier en balai. Au cours des autres heures de la journée (12h00 et 16h00), le potentiel hydrique foliaire a atteint des valeurs beaucoup plus faibles à 12h00 dans les zones Z1, Z3 et Z4 (-2,07 MPa) que dans la zone Z2 (-1,8 MPa). Ces valeurs ont tendance à demeurer constantes jusqu'à 16h00.

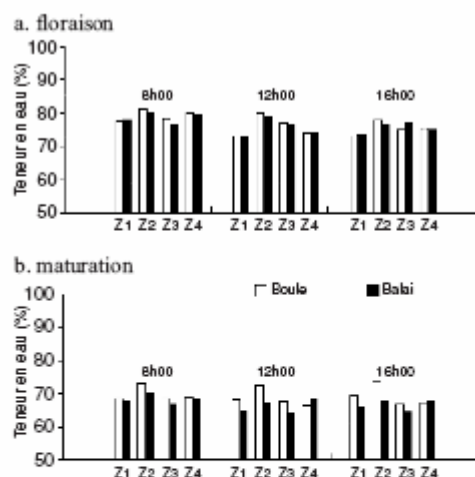
La teneur en eau des plantes a été mesurée pendant les mêmes périodes de mesure du potentiel hydrique foliaire. En période de floraison (Figure 9a), la teneur en eau des feuilles mesurée à 8h00 dans la zone située sous les houppiers (Z2) a été significativement plus élevée ($P = 0,017$) que celle des zones situées hors houppier (Z3, Z1, Z4). Cette différence a été plus manifeste surtout à 12h00. À cette heure de la journée, la teneur en eau des feuilles était en moyenne de

79,51 % dans Z2, 76,67 % dans Z3, 74,17 % dans Z4 et de 73,09 % dans Z1. En comparant les heures de mesure, la teneur en eau des feuilles dans les zones d'interaction diminue progressivement de 8h00 jusqu'à 16h00. Dans la zone Z1 la teneur en eau des feuilles passe de 77,4 % à 8h00, à 76,6 % à 12h00 et à 75,9 % à 16h00. Sous le houppier (Z2) cette diminution est relativement plus faible entre 8h00 (80,8 %) et 12h00 (79,5 %). Ces données montrent que le stress hydrique ne s'est pas beaucoup manifesté au moment de la floraison.

Pendant la période de maturation (Figure 9b) intervenue en septembre, seules les teneurs en eau des feuilles situées sous le houppier en boule sont restées légèrement au-dessus de 70 %. La teneur en eau des feuilles mesurée à 8h00 dans les zones sous houppier balai et hors houppier a été en moyenne de 67 %. Cette teneur n'a pas beaucoup évolué au cours des autres heures de la journée. La diminution de la teneur en eau des feuilles indique que le maïs a été plus stressé pendant cette phase qu'à la floraison. En effet, la maturation a coïncidé avec le mois de septembre et à cette période les pluies étaient rares et insuffisantes. Le mois de septembre a totalisé 94,9 mm repartis en huit jours de pluie. Suite à la rareté des pluies, un début de sénescence a été observé au niveau des feuilles basales du maïs.



Figures 8a et b. Évolution du potentiel hydrique (MPa) des feuilles de maïs selon la période de croissance (a. floraison, b. maturation), la forme du houppier, les zones d'interaction et l'heure de mesure — Evolution of the hydrous potential (MPa) of the maize leaves according to the period of growth (a. flowering, b. maturation), the form of the canopy, the zones of interaction and the hour of measurement.



Figures 9a et b. Évolution de la teneur en eau (%) des feuilles de maïs selon la période de croissance (a. floraison, b. maturation), la forme du houppier, les zones d'interaction et l'heure de mesure — Evolution of the water content (%) of the maize leaves according to the period of growth (a. flowering, b. maturation), the form of the canopy, the zones of interaction and the hour of measurement.

Tableau 2. Taux d'assimilation chlorophyllienne ($10^{-2} \mu\text{g mm}^{-2} \text{h}^{-1}$) au cours de la croissance du maïs selon le type de houppier du karité et les zones d'interaction — *Rate of photosynthesis ($10^{-2} \mu\text{g mm}^{-2} \text{h}^{-1}$) during growth of maize according to the canopy of the shea tree (ball and brush) and zones of interaction (Z1, Z2, Z3 and Z4).*

Jours après semis (JAS)	Z1	Z2	Z3	Z4	Moy.	CV* (%)	PPDS**
30 JAS							
Boule	146	90	123	112	119		
Balai	146	67	101	90	101		
Moyenne	146	78	112	101	109		
40 JAS							
Boule	525	119	594	594	458		
Balai	365	411	576	502	463		
Moyenne	445 ^a	265 ^b	585 ^a	548 ^a	461	22,5	171
50 JAS							
Boule	248	111	202	209	192		
Balai	209	104	196	278	188		
Moyenne	229 ^a	108 ^b	199 ^a	243 ^a	195	16,1	52
60 JAS							
Boule	146	48	85	97	94		
Balai	130	57	88	85	90		
Moyenne	138 ^a	53 ^b	86 ^b	91 ^b	92	17,6	27

Les moyennes suivies d'une même lettre ne sont pas significativement différentes au seuil de 5 % par la méthode de Newman-Keuls.

Z1 : zone hors houppier (culture en permanence au soleil); Z2 : zone sous houppier (culture en permanence à l'ombre); Z3 : zone intermédiaire 1 (culture au soleil le matin et à l'ombre l'après-midi); Z4 : zone intermédiaire 2 (culture à l'ombre le matin et au soleil dans l'après-midi).

* CV = coefficient de variation; ** PPDS = plus petite différence significative.

Les taux d'assimilation chlorophyllienne ont été évalués à 30, 40, 50 et 60 JAS. Les résultats sont portés sur le **tableau 2**. Ils ne diffèrent pas significativement entre les deux types de houppier. Par contre, en comparant les taux d'assimilation relevés dans les différentes zones d'interaction, on constate que le taux relevé dans Z2 est significativement moins élevé que les taux relevés dans Z1, Z3 et Z4 aussi bien à 40 JAS ($P = 0,003$) qu'à 50 et 60 JAS ($P < 5\%$). Dans le **tableau 2**, on constate que les taux relevés dans les zones d'interaction augmentent régulièrement depuis le 30^e JAS jusqu'au 40^e JAS où ils atteignent leur maximum ($461 \times 10^{-2} \mu\text{g mm}^{-2} \text{h}^{-1}$) avant de décroître vers le 60 JAS ($92 \times 10^{-2} \mu\text{g mm}^{-2} \text{h}^{-1}$). En comparant les moyennes, on remarque également que malgré l'effet d'ombrage momentané sur Z3 et Z4, leur taux est resté statistiquement équivalent au taux de Z1 à 40 et 50 JAS. À 60 JAS, le taux moyen relevé dans Z1 est par contre plus élevé que les taux moyens de Z3 et Z4. Les résultats du rendement et de ses composantes (**Tableau 3**) indiquent que, d'une manière générale, les poids des épis, des tiges et des grains sont plus

Tableau 3. Le rendement du maïs et ses composantes selon le houppier du karité et les zones d'interaction — *The yield of maize and its components according to the canopy of the shea tree (ball and brush) and zones of interaction (Z1, Z2, Z3 and Z4).*

Composantes de rendements	Z1	Z2	Z3	Z4	Moy.	CV ¹ (%)	Etr ² (ddP = 24)	PPDS ⁴
Poids des épis (g m^{-2})								
Boule	307	134	234	227	225	18,1	42,09	58,05
Balai	268	163	270	253	238	18,1	42,09	58,05
Moyenne	288 ^a	148 ^b	252 ^a	240 ^a				
Poids des tiges (g m^{-2})								
Boule	334	189	276	273	268	19,2	52,82	72,83
Balai	308	220	286	319	283	19,2	52,82	72,83
Moyenne	321 ^a	204 ^b	281 ^a	296 ^a				
Poids des grains (g m^{-2})								
Boule	252	109	205	191	189	18,3	35,94	49,56
Balai	220	153	229	209	202	18,3	35,94	49,56
Moyenne	236 ^a	131 ^b	217 ^a	200 ^a				
Poids de 1000 grains (g)								
Boule	161	172	173	178	171	7,8	13,13	
Balai	154	166	170	164	164	7,8	13,13	
Moyenne	158	169	172	171				

Les moyennes suivies d'une même lettre ne sont pas significativement différentes au seuil de 5 % par la méthode de Newman-Keuls.

¹ CV = coefficient de variation; ² Etr = écart type résiduel; ³ ddl = degré de liberté; ⁴ PPDS = plus petite différence significative.

élevés dans les zones d'interaction Z1, Z3 et Z4 qu'en Z2. L'analyse statistique révèle que ces résultats sont significativement différents dans les zones d'interaction. En revanche, entre les houppiers en boule et en balai, les résultats ne diffèrent pas significativement. Dans le classement des moyennes, Z1 présente le meilleur rendement en grains (236 g m^{-2}) suivi de Z3 (217 g m^{-2}) et Z4 (200 g m^{-2}) et en dernière position Z2 (131 g m^{-2}). Le poids des grains obtenu dans Z1 est de 236 g m^{-2} contre 131 g m^{-2} obtenu dans Z2. Cette différence est évaluée à 80 %. Le poids des tiges quant à lui a augmenté régulièrement dans Z1, Z4 et Z3 et est inférieur dans Z2. Le poids des grains relevé sous houppier en balai est de 153 g m^{-2} contre 109 g m^{-2} sous houppier en boule. Cette différence est évaluée à 40 %. C'est également sous houppier en boule que le poids des tiges est le plus bas.

4. DISCUSSIONS

En ce qui concerne les précipitations, leur interception par les arbres varie en fonction de leur intensité et de

la taille du houppier (Boffa, 2000). L'interception sera d'autant plus importante que la pluie est moins violente et le vent plus faible. Au cours de l'essai, la quantité de pluie reçue au sol hors houppier a été augmentée de 10,3 % sous le houppier en balai et diminuée de 12 % sous le houppier en boule. Cette différence entre les houppiers peut être en partie attribuée à l'orientation des vents dominants par rapport à la position des pluviomètres ou à la nature des deux types de houppier. Selon Ruysen (1957) le houppier en balai est généralement plus aéré et plus perméable à l'eau que le houppier en boule qui semble beaucoup plus compact et moins donc perméable à l'eau. Baldy et Stigter (1993) rapportent que la pluie interceptée par les organes aériens peut s'égoutter avec un retard plus ou moins important. L'égouttage se fera plus rapidement lorsque le houppier est moins dense et plus lentement lorsque le houppier est plus compact. Ce dernier cas s'accompagne généralement d'un ruissellement d'eau le long des branches et des troncs jusqu'au sol. Ces auteurs soulignent que cette distribution de la pluie au voisinage des troncs assure une suralimentation localisée du sol en eau.

Ce phénomène s'est traduit au cours de l'essai par une nette amélioration de l'humidité du sol sous les houppiers qu'en dehors du houppier. L'humidité accrue sous les houppiers peut en outre être attribuée à l'effet d'ombrage qui selon Jonsson (1995) contribue à modérer la température ambiante et à augmenter l'humidité de l'air. Cet effet d'ombrage permet de réduire l'évaporation du sol et la transpiration des cultures sous-jacentes. Toutefois, au fur et à mesure que les pluies se raréfient, le déficit de pression de vapeur d'eau augmente et l'humidité du sol sous houppier diminue.

L'excès de l'humidité du sol et l'insuffisance de l'éclairement sous houppier ont par ailleurs entraîné un mauvais développement des plants de maïs. La hauteur et le nombre de feuilles par plante ont été relativement plus élevés en dehors du houppier que sous le houppier. Cet écart entre les deux milieux s'explique en partie par la modération des températures sous l'effet d'ombrage. Selon Bonhomme (1984) l'émission des feuilles de maïs est très influencée par la température de l'air et celle du sol. Dans un milieu où la température du sol est plus basse que celle de l'air, le rythme d'apparition des premières feuilles est plus lent. Ce rythme est souvent à l'origine de la réduction de la hauteur des plants.

Concernant le potentiel hydrique foliaire, sa valeur moyenne journalière suit le potentiel hydrique du sol, par contre ses valeurs instantanées sont étroitement dépendantes de la demande transpiratoire (Robelin, 1984). Cette demande serait liée à l'augmentation du rayonnement et à l'élévation du déficit de pression de vapeur. Les données obtenues par la présente étude, à la floraison, n'ont pas révélé de différence

significative ni entre les houppiers ni entre les zones d'interaction. La sécheresse occasionnée par les cinq jours d'arrêt momentané des pluies à la floraison, a été moins sévère si bien que le potentiel hydrique foliaire du maïs est resté très élevé (-0,989 MPa) dans les zones d'interaction. Les valeurs du potentiel hydrique ont très peu varié au cours de la journée. Cette situation est due à la période des mensurations qui est intervenue en août. Le mois d'août est généralement très pluvieux et les phénomènes d'évaporation et de rayonnement moins intenses contribuent à conserver l'eau du sol. La tension de l'eau dans le sol à cette période a été plus élevée sous les houppiers (-18 KPa) qu'en dehors du houppier (-30 KPa). Les plantes se trouvent en ce moment en condition de confort hydrique. Par contre, à la maturation, intervenue en septembre, le déficit hydrique provoqué par l'arrêt de la pluie durant sept jours a été très intense, provoquant une diminution de la teneur en eau des feuilles de maïs (67 %). La tension de l'eau dans le sol est passée de -30 à 43 KPa en dehors du houppier et de -18 à -24 KPa respectivement sous le houppier en balai et en boule. Cette diminution de l'eau du sol a entraîné une baisse du potentiel hydrique foliaire du maïs (-2,07 MPa). L'abaissement du potentiel hydrique est relativement moins important sous houppier (-1,2 MPa) que hors houppier (-2,07 MPa). Au mois de septembre, suite à la diminution des précipitations, l'eau du sol diminue et le rayonnement solaire redevient plus intense. Diakite (1995) rapporte que la baisse progressive du potentiel hydrique foliaire de 8 heures à 12 heures serait liée à l'augmentation du rayonnement solaire durant cette période du jour et qui entraîne une élévation de l'évapotranspiration et du déficit de pression de vapeur à l'interface feuille-air.

La teneur en eau des feuilles a suivi également la même tendance que le potentiel hydrique en août, à la seule différence que sous les houppiers elle a été significative plus élevée (79,51 %) qu'en dehors du houppier (73,09 %). L'humidité accrue du sol sous les houppiers à cette période et l'effet d'ombrage ont dû favoriser cette tendance. En septembre la teneur en eau des feuilles diminue suite à la diminution de l'humidité du sol occasionnée par la rareté des pluies. Mais elle demeure toujours plus élevée sous le houppier en boule (70 %) où le sol est faiblement appauvri en eau.

La photosynthèse, facteur primaire de la production totale en matière végétale, constitue un meilleur indicateur du fonctionnement hydrique de la plante au cours d'une sécheresse. Pendant les poches de sécheresse, le maïs régule ses pertes en eau par la fermeture des stomates ou par réduction de ses surfaces transpirantes en enroulant ses feuilles (Hema, 1990). Cette régulation influe sur la photosynthèse. Selon Robelin (1984), la diminution de la perméabilité

aux gaz de la feuille à la suite de la fermeture des stomates freine l'entrée du gaz carbonique et par conséquent réduit l'activité photosynthétique. Les résultats obtenus au cours de cette étude révèlent que le taux d'assimilation chlorophyllienne sous le houppier est significativement moins élevé que le taux hors houppier. Ce niveau bas du taux d'assimilation constaté sous les houppiers ne peut être attribué à l'effet d'un déficit hydrique car sous les karités le sol est resté constamment humide pendant une bonne partie de la saison. Il peut être dû à l'effet d'ombrage. En effet, selon des auteurs (Kessler, 1992; Bayala *et al.*, 2000), la réduction de la production de la matière sèche sous les arbres serait en partie due à l'insuffisance de la quantité d'éclairement. Au cours de la croissance et du développement du maïs on constate que la demande d'assimilats se modifie sans cesse. Elle se trouve particulièrement plus élevée à la floraison (40 JAS) et plus faible à la maturation (60 JAS). Selon Prioul (1984), cette demande en phase de reproduction est due à la mise en place de certains organes (tige, spathes, rafles) qui vont servir de réservoirs pour alimenter les épis au cas où l'approvisionnement serait défaillant au niveau des feuilles. La baisse du taux d'assimilation à 60 JAS peut être attribuée à la contrainte hydrique observée au moment de la maturation et dans ce cas la plante met à profit ses réservoirs afin d'assurer le remplissage de l'épis.

Concernant la productivité, les résultats ont révélé que le poids des grains, le poids des tiges et celui des épis ont été significativement plus élevés dans les zones hors houppier que sous houppier. Le rendement du maïs a été réduit de 35 % sous le port en balai contre 54 % sous le port en boule. On remarque que malgré l'importance de l'humidité et la fertilité du sol sous les houppiers, la production du maïs est restée bien inférieure à celle relevée hors houppier. Des observations semblables ont été faites sur une culture de sorgho associée au néré et au karité où les rendements avaient fléchi dans les parcelles sous houppier (Maïga, 1987; Kessler, 1992). Ces auteurs soulignent que cette diminution de rendement est fortement corrélée à une diminution régulière de l'intensité lumineuse constatée sous les arbres.

5. CONCLUSION

Il ressort de ce travail que la présence du karité dans les parcelles agricoles crée un environnement agroécologique favorable à la croissance des cultures. Sous les karités, bien qu'une partie des précipitations soit interceptée par le houppier, le taux d'humidité du sol est resté plus élevé dans le temps, par rapport à celui du sol hors houppier. Cette humidité accrue du sol sous les houppiers a permis de réduire le stress

hydrique du maïs à la maturation des grains, période au cours de laquelle les pluies étaient rares et insuffisantes. Mais l'effet ombrage a contribué également à réduire l'activité photosynthétique sous les karités.

Lorsqu'on analyse les composantes de rendement en relation avec les différents ports du karité, on peut affirmer que l'ombrage des houppiers en balai affecte moins à la baisse la croissance et la productivité du maïs que celui des houppiers en boule. Dans les zones sous influence de l'ombrage le matin ou l'après-midi, les rendements ont certes été réduits mais pas de façon significative par rapport à la zone hors houppier.

Remerciements

Les auteurs tiennent à remercier sincèrement l'Association des Universités Africaines (AUA) qui a financé le projet soumis par le CERAAS.

Bibliographie

- Baldy C., Stigter C.J. (1993). *Agrométéorologie des cultures multiples en régions chaudes*. Paris: INRA, 246 p.
- Bayala J., Teklehaimanot Z., Ouedraogo J.S. (2002). Millet production under pruned tree crowns in a parkland system in Burkina Faso. *Agrofor. Syst.* 54, p. 203–214.
- Boffa J.M. (1995). *Productivity and management of agroforestry parklands in the Sudan Zone of Burkina Faso, West Africa*. Ph.D. Thesis. Purdue Univ. USA, 99 p.
- Boffa J.M. (2000). Les parcs agroforestiers en Afrique subsaharienne. *Cah. FAO Conserv.* 34, 258 p.
- Bonhomme R. (1984). Fonctionnement photosynthétique du couvert végétal. In *Physiologie du maïs*. Paris: INRA, p. 147–162.
- Bureau National des Sols (BUNASOL) (1987). *Méthodes d'analyse physiques et chimiques des eaux et du sol. Document technique n°3*. Ouagadougou, Burkina Faso: BUNASOL, 159 p.
- Diakité T. (1995). *Concurrence pour l'eau et les éléments nutritifs du sol entre ligneux et cultures. Le karité et le sorgho en zone semi-aride au Mali*. Mémoire M.Sci. Univ. Laval, Québec, Canada, 69 p.
- FAO (2000). Annuaire FAO de la production. Collection *FAO statistique* 163, p. 71–83.
- Hema D. (1990). *Adaptation à la sécheresse du maïs. Rapport CERAAS*, 10 p.
- Hema D. (1994). *Étude de la résistance à la sécheresse chez le maïs (Zea mays L.). Analyse de la variabilité génétique de quelques caractères agrophysiologiques*. Thèse Doct. Univ. Nat. de Côte d'Ivoire, 151 p.
- Jonsson K. (1995). *Agroforestry in dry savanna areas in Africa: interactions between trees, soils and crops*.

- Ph.D. Dissertation. Swedish Univ. of Agricultural Science. Umea, Sweden, 92 p.
- Institut de l'Environnement et de Recherches Agricoles (INERA) (1993). *Caractérisation des stations de recherches agronomiques de Di, Katchari et Kouaré. Rapport technique*. Ouagadougou, Burkina Faso : INERA, p. 69–82.
- Jonsson K., Ong CK., Odongos JCW. (1999). Influence of scattered nere and karite on microclimate, soil fertility and millet yield in Burkina Faso. *Exp. Agric.* 35, p. 39–53.
- Kessler JJ. (1992). The influence of karité (*Vitellaria paradoxa*) and néré (*Parkia biglobosa*) trees on sorghum production in Burkina Faso. *Agrofor. Syst.* 17, p. 97–118.
- Maiga A. (1987). *L'arbre dans les systèmes agroforestiers traditionnels dans la province du Bazèga. Influence du karité, du néré et de Acacia albida sur le sorgho et le mil. Rapport de stage*. IRBET/CNRST Ouagadougou, 86 p + annexes.
- Nyberg G., Höghberg P. (1995). Effects of young agroforestry trees on soils in farm situations in Western Kenya. *Agrofor. Syst.* 32, p. 145–152.
- Ouedraogo M. (2000). *Étude biologique et physiologique du Jatropha curcas L.* Thèse d'État Université de Ouagadougou, Burkina Faso, 289 p.
- Prioul JL. (1984). Transport et distribution des assimilats chez le maïs : mécanisme, rôle des facteurs externes. In Gallais A. (Ed.). *Physiologie du maïs*. Paris : INRA, p. 303–319.
- Robelin M. (1984). Fonctionnement hydrique et adaptation à la sécheresse. In Gallais A. (Ed.). *Physiologie du maïs*. Paris : INRA, p. 345–376.
- Rondeux J. (1993). *Les mesure des arbres et des peuplements forestiers*. Gembloux, Belgique : Les Presses agronomiques de Gembloux, 521 p.
- Ruyssen B. (1957). Le karité au Soudan. *Agron. Trop.* XI (2), p. 144–172 ; XII (3), p. 279–306 ; XII (4), p. 415–438.
- Sinclair FL. (1999). A general classification of agroforestry practice. *Agrofor. Syst.* 46, p. 161–180.
- Sivakumar MVK., Gnoumou F. (1987). Agroclimatology of West Africa. Burkina Faso. *ICRISAT Inf. Bull.* 23, p. 1–62.
- Somé L. (1989). *Diagnostic agropédoclimatique du risque de sécheresse au Burkina Faso. Étude de quelques techniques agronomiques améliorant la résistance pour les cultures de sorgho, de mil et de maïs*. Thèse Doct. Univ. Montpellier II, 213 p.
- Young A. (1986). Effects of trees on soils. In RT. Prinsley, MJ. Swift (Eds). *Amelioration of soil by trees*. London: Commonwealth Science Concil, p. 10–15.

(25 réf.)

PUBLICATION N° 2

ZOMBOUDRE G., ZOMBRE G., OUEDRAOGO M., GUINKO S. et ROY-MACAULEY H., 2005. Productivité du maïs (*Zea mays* L.) associé au karité (*Vitellaria paradoxa* Gaertn.) dans un système agroforestier. *Rev. CAMES-Série A* **3**:19-27.

Productivité du maïs (*Zea mays* L.) associé au karité (*Vitellaria paradoxa* Gaertn.) dans un système agroforestier

G. ZOMBOUDRE¹, G. ZOMBRE¹, M. B. OUEDRAOGO¹, S. GUINKO et H. MACAULEY²

RESUME

Le comportement d'une culture de maïs en situation de sécheresse a été étudié dans un parc à karité. Trois zones de la surface sous influence de l'ombrage de chacune des deux formes de houppier de ce parc (boule et balai) ont été comparées à la zone située hors houppier. La teneur en eau et la fertilité du sol, le taux d'assimilation chlorophyllienne, la croissance et la productivité du maïs ont été évalués dans ces zones. Les précipitations sont plus élevées sous le houppier en balai que sous le houppier en boule. La teneur pondérale en eau du sol s'est révélée par contre plus élevée sous le houppier en boule aussi bien en août qu'en septembre, à cause de l'importance de l'ombrage contribuant à réduire la transpiration des cultures sous-jacentes et l'évaporation du sol. Les sols sont restés plus fertiles sous les houppiers qu'en dehors du houppier. La réduction de croissance du maïs sous les houppiers, par rapport à la zone hors houppier, serait due à l'effet négatif de l'ombrage. L'effet est plus excessif au voisinage des houppiers en boule que sous et près des houppiers en balai. Le taux d'assimilation est plus élevé dans les zones hors houppier. La production du maïs, tant en grain qu'en tige et en épis, a été statistiquement plus élevée hors du houppier que sous le houppier. Elle est relativement plus élevée sous le houppier en balai que sous le houppier en boule.

Mots clés : Karité, maïs, sécheresse, interaction arbre-culture, croissance, productivité.

SUMMARY

Hydrous relations and productivity of the cultures in a traditional agroforestry system : case of maize (*Zea mays* L.) associated the shea tree (*Vitellaria paradoxa* Gaertn.) in the zone of Burkina Faso.

This study was conducted on the behaviour of corn cultivated in a forest park of shea butter tree. The surface under the influence of shading of the two forms of canopy of this species, termed ball and brush, were compared with the zone located outside the shade of the canopy. Soil water content, fertility and deficit, growth and productivity of corn were evaluated in these zones. Rainfall was higher under the brush canopy than under the ball canopy. The soil water content appeared to be higher under the ball canopy than the brush canopy in August and September, because of the importance of the shading due to the ball canopy, which contributes to reducing transpiration of the crop and evaporation of water from the soil. Soil water matrix potential variation was higher both under the brush canopy and outside the shade of the canopy. The soil was found to be more fertile under the canopy than outside the canopy. Grain and ear yield as well as stem biomass were relatively higher under the brush canopy than the ball canopy. However they were lower under than outside the canopy.

Key words : Shea butter tree, corn, interaction tree-crop, growth, productivity.

INTRODUCTION

Au Burkina Faso, l'agriculture est largement dominée par les cultures pluviales dont les plus importantes en production restent le sorgho, le mil et le maïs. Selon les estimations de la F.A.O (2000), près de 2,9 millions d'hectares sont mis en culture chaque année au Burkina. Le maïs occupe 8 à 9% de cette superficie et représente 14% de la production nationale.

Jadis effectuée autour des cases où elle bénéficie de la matière organique provenant des ordures ménagères et des déjections du petit bétail, la culture du maïs est pratiquée actuellement en plein champ. Dans ce milieu de production, où il n'y a pratiquement pas d'apport de fertilisation, les systèmes agricoles sont

demeurés de type traditionnel et itinérant, basés sur l'exploitation des ressources naturelles (SOME, 1989).

Cette agriculture itinérante, très consommatrice d'espace, évolue dans un contexte de faible niveau de fertilité des sols et de climat très défavorable caractérisé par l'insuffisance et la mauvaise répartition spatio-temporelle des pluies. De nos jours avec la persistance de la sécheresse, les rendements des cultures et particulièrement ceux du maïs ont tendance à se plafonner et dépassent rarement 0,7 à 1 tonne/ha en milieu pay-

1- Université de Ouagadougou, UFR-SVT BP 7021

2- CERAA5, Thuis Ecole SPNREGAL

Auteur principal : Gélard ZOMBRE, Université de Ouagadougou, UFR/SVT BP 7021 OUAGADOUGOU 03 Burkina Faso
Tél : (226) 26 85 38 14, e-mail : g.zombre@univ-ouga.bf

rangement spatial aléatoire (SINCLAIR, 1999; BOFFA, 2000). L'avantage de l'intégration de l'arbre dans les systèmes de production a été souligné par plusieurs auteurs (MAIGA, 1987; NYBERG et HOGBERG, 1995; BOFFA, 1995, 2000; JONSSON et al., 1999).

Par contre, les effets de l'arbre sur les cultures en association semblent contradictoires.

Dans la zone d'influence de l'arbre, les rendements des cultures sont tantôt meilleurs (YOUNG, 1986; DIAKITE, 1995) et tantôt réduits (MAIGA, 1987; KESSLER, 1992; BOFFA, 1995). Dans ce dernier cas de figure, la compétition entre l'arbre et la culture pour l'utilisation de l'eau et de la lumière a été souvent mise en cause.

La compétition pour l'eau se manifeste généralement en début de saison, lorsqu'une partie des pluies, est interceptée par le houppier. La quantité d'eau qui atteint le sol situé sous houppier peut s'avérer insuffisante du fait qu'ensemble, l'arbre et la culture sous-jacente, absorbent plus d'eau que la composante culturale unique (BOFFA, 2000).

Dans les zones à pluviométrie irrégulière, cette insuffisance d'eau sous le couvert des arbres peut persister une bonne partie de la saison des pluies. Mais, à mesure que la saison avance, les sites arborés tendent à devenir plus humides que les zones découvertes à cause de l'effet d'ombrage (JONSSON, 1995; BOFFA, 2000). Cette humidité accrue des sites arborés en milieu de saison ne semble pas se justifier totalement (DIAKITE, 1995). En cas de sécheresse, les horizons superficiels du sol sous le couvert arboré s'assèchent progressivement et de manière uniforme (BOFFA, 2000). Ainsi, au cours d'une saison de végétation, l'alimentation en eau des cultures dans un site arboré sera bonne ou déficitaire selon l'importance et la distribution des précipitations.

Le présent travail a pour but de mieux comprendre le comportement d'une culture en situation de contrainte hydrique naturelle dans une formation végétale, d'évaluer dans cette formation végétale, la teneur en eau du sol, le niveau du stress hydrique du maïs et sa productivité selon le port de l'arbre dans la zone d'influence de l'ombrage du houppier.

1. MATÉRIEL ET MÉTHODES

1.1. Le site d'étude

La formation végétale étudiée est un parc à karité. Elle couvre une superficie de 1 ha et est localisée à l'intérieur de la station de recherche agricole de Kouré dans la province du Gourma. La station de Kouré est située à 305m d'altitude et s'inscrit en parallèle entre 12°5'N et 11°55'S et en méridien entre 0°10' et 0°25'W.

Le climat de la zone d'étude est de type nord-soudanien et comprend deux saisons principales : une saison sèche d'octobre à mai et une saison pluvieuse de juin à septembre avec une pluviométrie moyenne en année normale variant de 850 mm à 1050 mm et en année de sécheresse entre 550 mm et 850 mm. La distribution des pluies est de nature unimodale (SIVAKUMAR et GNOMOU, 1987).

Les sols de la zone d'étude sont de type ferrugineux tropicaux lessivés indurés peu profond (INERA, 1993). La fraction granulométrique est dominée par le limon en surface (52%) et en profondeur (33%). Les fractions de sable et d'argile sont respectivement de 27% et 21% en surface et de 50,5% et 16,6% en profondeur. Le sol présente une carence moyenne en Potassium (1639 ppm) et en Phosphore (302 ppm).

Le matériel végétal est composé des pieds de karité dont les ports sont en boule et en balai (planche 1) et d'une variété de maïs de 90 jours de cycle, communément appelée KPB (Kamboinsé Précoce Blanc).

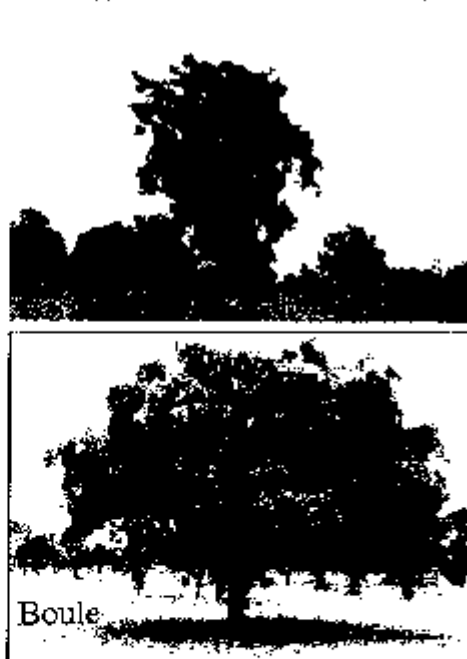


Planche 1. Formes de houppier retenues pour l'étude (Boule et Balai)

1.2. Mise en place de la culture

Les travaux de terrain ont consisté à réaliser un labour à plat suivi du hersage au tracteur dès le début du mois de juillet, date à laquelle les premières pluies

sont tombées. Les semis se sont déroulés dans le même mois (11 et 12 juillet) à des écartement de 0,40m entre les poquets et 0,80m entre les lignes. Deux sarclages ont été effectués, le premier étant intervenu au moment du démarrage et le second 15 jours plus tard. La récolte est intervenue dans la première quinzaine du mois d'octobre.

1.3. Le Dispositif expérimental

La formation végétale de l'aire étudiée est dominée par le karité. Elle couvre une superficie de 1ha avec un effectif de 33 pieds de karité. Les arbres voisins et distants de moins de 5m représentent 42% des pieds et leur houppier est presque fusionné, 58% des arbres sont suffisamment dispersés sur l'aire d'étude et l'espacement entre deux arbres voisins varie de 15 à 20m. Le port du houppier est du type balai chez 60% des karités et le volume du houppier est compris entre 26 et 116m³. Parmi les karités à port en boule, seulement 30% des pieds ont un volume de houppier compris entre 200 et 500m³. Selon DIAKITE (1995) ce peuplement pourrait être jeune car la totalité des karités présente un houppier de faible volume (inférieur à 500m³). Les caractéristiques des 08 sujets retenus pour la présente étude sont regroupées dans le tableau I. Un inventaire

Tableau I : Caractéristiques morphologiques des arbres choisis pour l'étude

Arbres	Caractéristiques des arbres	Données	Port	Données	Volume du houppier
	nom	11,20 m (cm)	houppier (m ³)	en m ³ (m ³)	houppier (m ³)
1 ^{er}	044	1,7	74	4,2	207
2 nd	051	1,6	75	1,9	240
4 th	022	18,4	25	5,6	313
1 ^{er}	071	1,4	70	4,4	200
1 ^{er}	006	4,1	32	4,5	95
2 nd	030	1,6	45	1,8	100
4 th	020	1,6	44	7,9	129
2 nd	024	3,3	54	5,4	116
Moyenne	073	6,8	52	3,6	196

1 : arbre avec un houppier en boule

2 : arbre avec un houppier en balai

suit de mensurations des arbres présents a été réalisé avant le démarrage de la campagne. Les résultats de cet inventaire ont permis d'opérer un choix au hasard de 8 pieds de Karité dispersés à l'intérieur du parc et suffisamment distants les uns des autres de façon à ce que l'ombre projetée des houppiers ne se recoupe pas. Les 8 pieds de karité sont composés de 4 pieds avec un port en boule et de 4 autres avec un port en balai. Parmi les deux ports, chaque pied a été considéré comme une répétition, et fait partie d'une parcelle dont le centre est le point central de la projection verticale du houppier au sol. Dans chacune des parcelles, quatre zones d'interaction arbre-culture représentées par des placettes, ont été délimitées de part et d'autre des arbres, sur les axes est-ouest et nord-sud passant par le centre de la projection du houppier et à des distances qui étaient fonction du rayon (R) de cette projection (figure 1). Les zones d'interaction sont les suivantes :

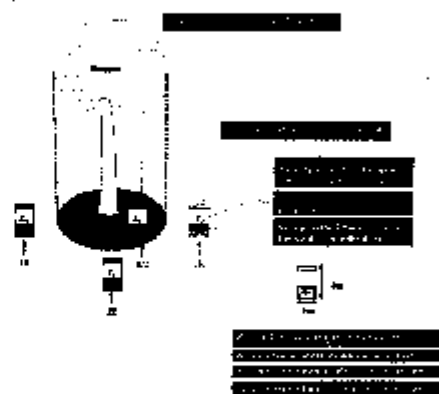


Figure 1 : Dispositif expérimental

Z₁ : zone hors houppier (culture en permanence au soleil)

Z₂ : zone sous houppier (culture en permanence à l'ombre)

Z₃ : zone intermédiaire 1 (culture au soleil le matin et à l'ombre dans l'après-midi)

Z₄ : zone intermédiaire 2 (culture à l'ombre le matin et au soleil dans l'après-midi).

Pour une meilleure influence de l'ombrage du houppier sur la culture, ces distances ont été ramenées à R/2 pour la zone Z2 et à 2R pour les zones Z1, Z3 et Z4.

Chaque placette de dimensions 4m x 3m, a été divisée en trois sous-placettes : une sous-placette centrale, de 2 x 3m, pour la mesure de la biomasse aérienne du maïs et deux sous-placettes latérales, l'une de 0,5 x 3m, utilisée pour déterminer le potentiel hydrique du maïs et l'autre, de 1,5 x 3m, pour l'étude de l'humidité du sol. La position de l'une et l'autre des sous-placettes latérales par rapport à la sous-placette centrale a été déterminée au hasard.

II. LES METHODES DE MESURE

Les mesures prises sur les karités de la zone étudiée comprennent : la circonférence à 1,30m de hauteur ou à hauteur de poitrine à l'aide d'un mètre ruban (GOUNOT, 1969) ; la hauteur totale, la hauteur du fût et la hauteur du houppier, mesurées avec une perche télescopique ; le diamètre du houppier mesuré avec un ruban de 30m. La forme du houppier a été déterminée par observation visuelle et en se référant aux trois catégories de port (boule, balai et parasol) décrites par RUYSEN (1957).

Le volume du houppier a été calculé à partir de deux formules proposées par RONDEUX (1993) suivant la forme architecturale du houppier :

- **port en boule et fuseau**

$$V = 4/3\pi \times (\text{hauteur estomac})^2 / 2 \times (\text{diamètre nord-sud}) / 2 \times (\text{hauteur du houppier}) / 2$$

 N.B.: V = volume du houppier
 $\pi = 3,14$

- **port en parasol**

$$V = \pi/10 \times (\text{diamètre sol ouvert}) \times (\text{diamètre nord-sud}) \times (\text{hauteur du houppier})$$

2.1. Analyses des échantillons de sol

Des échantillons de sol ont été prélevés à 10 cm de profondeur, dans les sous-placettes de 2 x 3m du dispositif expérimental, pour la caractérisation physique et chimique.

Les trois échantillons de chaque placette ont été mélangés, pour former un échantillon composite. Le carbone (C) organique a été déterminé par oxydation du sol dans une solution aqueuse de bichromate de potassium et d'acide sulfurique et par titrage avec une solution de sulfate ferreux (BUNASOL, 1987). L'azote (N) total a été déterminé par digestion selon la méthode Kjeldahl : digestion des sols à 420°C en présence d'acide sulfurique et d'un catalyseur, suivie d'une distillation et d'un titrage de N. Le phosphore (P) total et le potassium (K) total ont été respectivement déterminés par la méthode Bray II par colorimétrie et par spectrophotométrie.

2.2. Humidité du sol

L'évolution de l'humidité du sol sous le couvert des deux parts du karité et dans la zone découverte a été suivie en août et en septembre par la méthode directe de gravimétrie et la tensiométrie. Par la méthode directe de gravimétrie, des échantillons de sol ont été prélevés dans les sous-placettes de 1,5m x 3m, à 30cm de profondeur, à l'aide d'une tarière. La différence entre le poids frais et le poids sec, représente la quantité d'eau pondérale et, en la divisant par le poids sec, on obtient le pourcentage d'humidité en équivalent du poids sec.

La méthode tensiométrique renseigne sur l'état du potentiel hydrique du sol. Pour la présente étude, les tensiomètres ont été installés dans le sol à 30cm de profondeur. Les lectures de potentiel ont été effectuées tous les matins pour éliminer les effets thermiques.

2.3. Croissance et productivité

La hauteur des plants a été mesurée à l'aide d'une règle graduée au millimètre en prenant la distance entre le pied d'ancrage (au niveau du sol) et le sommet d'apparition des dernières feuilles pour la phase végétative, et l'extrémité de la panicule après la floraison.

Les mesures de la hauteur des plants et le comptage du nombre de feuilles apparentes ont été effectués par décade, sur 5 pieds de maïs pris au hasard dans chaque placette.

Le taux d'assimilation chlorophyllienne a été mesurée sur des disques foliaires prélevés à l'aide d'un emporte-pièce le matin avant le lever du soleil (5 heures) et le soir après le coucher du soleil (18 heures) sur la 3e feuille à partir du sommet de la tige (OUEDRAOGO, 2000).

Le taux d'assimilation exprimé en $\mu\text{g}/\text{mm}^2/\text{heure}$ a été calculé selon la formule suivante :

$$TA = (P_{\text{soir}} - P_{\text{matin}}) / (S.D.F / D)$$

TA = taux d'assimilation

P_{soir} = Poids sec du soir,

P_{matin} = Poids sec du matin,

S.D.F = surface disque foliaire,

D = durée d'insolation du jour de mesure.

À la fin du cycle et dans chacune des sous-placettes, les variables tels que le nombre d'épis, le poids des épis, le poids des tiges, le poids des grains et le poids de 1000 grains ont été mesurées.

III. RÉSULTATS

Les données collectées ont été soumises à une analyse de variance (ANOVA) à l'aide du logiciel STATISTICAL version 5. Les moyennes ont été comparées par le test de NEWMAN et KEULS au seuil de 5 % (niveau de probabilité retenu pour parler d'effet significatif).

3.1. Les teneurs en éléments nutritifs du sol

Évaluées dans l'horizon 0-10cm, elles n'ont pas varié significativement en fonction de la forme du houppier. Elles sont restées un peu plus élevées pour le houppier en boule que pour celui en balai, exceptées les teneurs en potassium (K) et en phosphore (P). Les teneurs moyennes en carbone (C), en azote (N) et en phosphore (P) étaient respectivement de 6,8 g kg⁻¹, 0,49 g kg⁻¹, 97,38 mg kg⁻¹ au niveau des houppiers en boule, contre 6,19 g kg⁻¹, 0,46 g kg⁻¹ et 111 mg kg⁻¹ au niveau des houppiers en balai. Dans les zones d'influence de l'ombrage de l'arbre les teneurs en éléments nutritifs ont été significativement plus élevées dans Z2 (P < 0,05) située en permanence dans l'ombre, sous les karités que dans Z3, Z1 et Z4 situées hors houppier (tableau II). L'analyse des résultats du tableau II montre que les teneurs en éléments nutritifs dans Z4 bien que légèrement plus élevées, demeurent statistiquement équivalentes à celles de Z1 et de Z3.

Effet de l'arbre sur l'eau, de pluie et l'humidité du sol.

Tableau II. Caractéristiques chimiques de l'horizon 0-10 cm du sol du trial ainsi que le type de houppier et les zones d'interaction entre la Karité et le Mame.

variables	Zones d'interaction				Moyenne
	Z1	Z2	Z3	Z4	
Houppier en boule					
Cat-boule (g kg ⁻¹ ± SE)	5,88 ± 1,45	9,83 ± 3,92	5,13 ± 0,72	4,78 ± 1,39	6,80 ± 2,61
NCO (% ± SE)	1,20 ± 0,25	1,78 ± 0,67	0,86 ± 0,13	1,10 ± 0,30	1,38 ± 0,38
N-total (g kg ⁻¹ ± SE)	0,44 ± 0,03	0,65 ± 0,20	0,38 ± 0,07	0,48 ± 0,10	0,49 ± 0,11
P-total (mg kg ⁻¹ ± SE)	74,90 ± 24,19	140,27 ± 77,85	81,90 ± 13,61	91,25 ± 18,14	97,38 ± 18,48
K-total (mg kg ⁻¹ ± SE)	2044,75 ± 122,85	2308,25 ± 453,92	1870,75 ± 218,5	2042,50 ± 182,91	1989,06 ± 222,81
Houppier en balai					
Cat-boule (g kg ⁻¹ ± SE)	3,69 ± 0,75	7,69 ± 0,98	4,85 ± 0,28	6,80 ± 0,40	6,12 ± 0,60
NCO (% ± SE)	0,07 ± 0,17	1,33 ± 0,35	0,43 ± 0,06	1,19 ± 0,05	1,07 ± 0,11
N-total (g kg ⁻¹ ± SE)	0,44 ± 0,03	0,57 ± 0,06	0,34 ± 0,03	0,50 ± 0,03	0,46 ± 0,08
P-total (mg kg ⁻¹ ± SE)	94,30 ± 14,62	133,25 ± 24,87	104,00 ± 17,52	111,35 ± 23,70	113 ± 18,73
K-total (mg kg ⁻¹ ± SE)	1934,3 ± 486,22	2073,31 ± 303,79	1792,77 ± 304,03	2116,27 ± 412,83	2025,66 ± 402,05

Z1 : zone hors houppier (sol hors houppier en boule)
 Z2 : zone sous houppier (sol hors houppier en balai)
 Z3 : zone sous balai (sol sous balai)
 Z4 : zone sous balai (sol sous balai)

Pour quantifier le déficit hydrique, l'humidité du sol a été mesurée ainsi que les précipitations reçues au sol sous le karité et en dehors du karité. Comme l'indique la figure 2, les pluies reçues au sol sous le houppier en balai entre juillet et octobre sont nettement plus élevées que celles reçues hors houppier et sous le houppier en boule. Par contre sous le houppier en boule les pluies

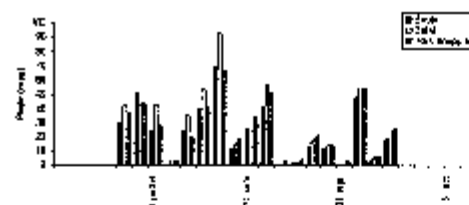


Figure 2 : Variation des précipitations moyennes pentadaires (mm) relevées pendant l'expérimentation sous houppier (Boules et Balais) et hors houppier.

reçues au sol ont été plus faibles qu'en zone découverte. Entre juillet et octobre le cumul pluviométrique a été de 524,7 mm sous le houppier en balai, 420,5 mm sous le houppier en boule et 475,8 mm hors houppier. Comparativement à la pluviométrie hors houppier, on note une réduction moyenne de 12% des pluies sous le houppier en boule et un excédent moyen de 10,3% sous le houppier en balai. Du point de vue répartition, la figure 2 indique également que les pluies ont été mal réparties entre juillet et octobre. Elles ont été abondantes entre la mi-juillet et août et se sont un peu raréfiées en septembre et en octobre.

(40e au 50e JAS), à 30cm de profondeur, a été de 12% pour les sols situés sous le houppier en boule, de 11,2% pour les sols situés sous le houppier en balai et enfin de 10,6% pour les sols hors houppier.

En septembre (60e au 70e JAS), avec la diminution de la pluviosité, la teneur en eau pondérale du sol a été de 10,7% sous le houppier en boule, de 8,86% sous le houppier en balai et de 7,5% en zone hors houppier (figure 3). La teneur en eau du sol a moins varié sous le houppier en boule entre août et septembre et cela s'est manifesté au niveau de tension de l'eau dont les valeurs sont restées élevées pendant cette même période.

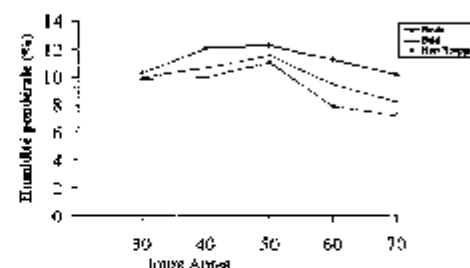


Figure 3 : Teneur en eau (%) du sol sous houppier (Boule et Balai) et hors houppier

Les effets de l'arbre sur l'humidité du sol sont traduits par l'évolution des potentiels matriciels de l'eau dans le sol. Les évolutions des tensions à 30cm de pro-

fondeur (figure 4) montrent que les variations ont été plus accentuées pour les sols situés sous le houppier en balai et hors houppier. En effet avant une pluie, les valeurs extrêmes du potentiel pour ces sols descendent souvent en dessous de -30 KPa. Cependant, pour les sols situés sous le houppier en boule, les tensions oscillent autour de -20 KPa. Ceci montre bien que le sol sous le houppier en boule est toujours plus humide que les sols hors houppier et sous houppier en balai. Si l'humidité du sol varie très peu sous le houppier en boule, cela s'explique en partie par l'importance de l'ombrage qui contribue à réduire la transpiration des cultures sous-jacentes et l'évaporation du sol. La figure 4 montre également que le potentiel hydrique des sols situés sous le houppier en balai ne remonte à des valeurs élevées (-10 KPa) qu'après une pluie ≥ 40 mm. Ce potentiel est rarement atteint au niveau des sols situés hors houppier en raison de l'importance de l'évaporation du sol et de la transpiration des cultures provoquée par le rayonnement et le vent.

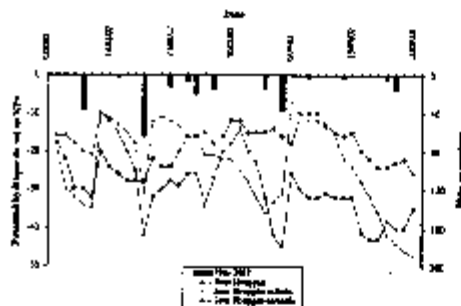


Figure 4 : Evolution des tensions de l'eau (KPa) du sol à 30 cm de profondeur sous houppier (Boule et Balai) et hors houppier

3.2. La croissance du maïs

Les variables concernant la croissance des plantes sont la hauteur des plants et le nombre de feuilles. Les mesures ont été effectuées par décennie et dans les zones d'interaction suivant le type de houppier. Les données ont permis de procéder à une analyse de variance et de présenter graphiquement les moyennes (figure 5 et 6). On constate que les hauteurs des plants à maturité ne diffèrent pas significativement entre les deux formes de houppier. Par contre dans les zones d'interaction, elles ont été significativement plus élevée en dehors des houppiers ($P = 0,0055$) que sous les houppiers. La hauteur des plants à maturité était en moyenne de 189 cm en dehors du houppier, de 162 cm sous le houppier en balai et de 143 cm sous le houppier en boule. En ce qui concerne la variable nombre des

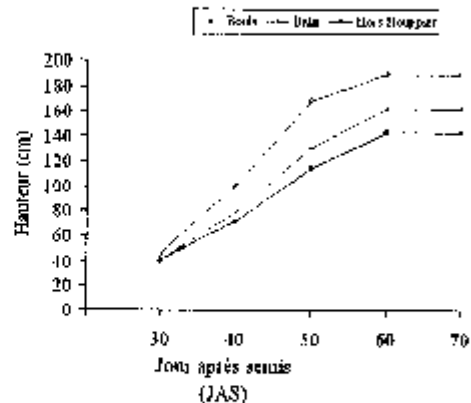


Figure 5 : Evolution de la hauteur (cm) des plants de maïs sous houppier (Boule et Balai) et hors houppier

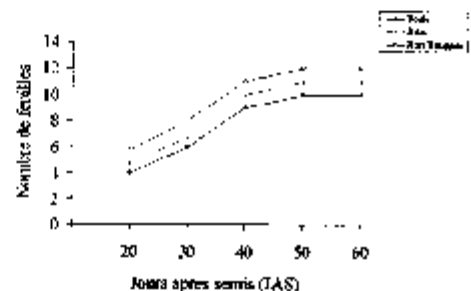


Figure 6 : Evolution du nombre de feuilles formées au cours de la croissance du maïs sous houppier (Boule et Balai) et hors houppier

feuilles, elle a été significativement plus élevée hors houppier ($p = 0,0019$) que sous le houppier. Les différences en nombre de feuilles par plante sont également significatives ($p = 0,04$) entre le houppier en boule et le houppier en balai. L'excès d'ombrage sous le houppier en boule explique en partie ces résultats. Le nombre moyen de feuilles par plante à 60 JAS a été de 12 dans la zone hors houppier, de 11 sous le houppier en balai et de 10 sous le houppier en boule. La différence des hauteurs et le nombre de feuilles constatée sous houppier et hors houppier confirme bien que le maïs est une plante de lumière.

3.3. Taux d'assimilation chlorophyllienne et productivité du maïs

Les taux d'assimilation chlorophyllienne ont été évalués à 30, 40, 50 et 60 JAS. Les résultats sont portés sur le tableau III. Il ne diffère pas significativement entre les deux types de houppier. Par contre, en com-

Tableau 17. "Temps de mise en circulation des" (en g) et du C en ppm de l'APRABLA de nuit. Selon le temps de l'apport

Can anyone answer these questions and explain why some are correct and others are not?

tion augmentent régulièrement depuis le 30ème

Les résultats du rendement et de ses composantes (tableau IV) indiquent que d'une manière générale les poids des épis, des tiges et des grains sont plus élevés dans les zones d'interaction Z1, Z3 et Z4 que dans Z2. L'analyse statistique révèle que ces résultats sont significativement différents dans les zones d'interaction. Dans le classement des moyennes, Z1 présente le meilleur rendement en grains (236 g m^{-2}) suivi de Z3 (217 g m^{-2}) et Z4 (200 g m^{-2}) et en dernière position Z2 (131 g m^{-2}). Le poids des grains obtenu dans Z1 est de 80% supérieur au poids des grains obtenu dans Z2 (236 contre 131 g m^{-2}).

© 2006 The Authors
Journal compilation © 2006 Blackwell Publishing Ltd

L'Espresso: non è il 14-16% di cui si parla ma la differenza tra i due paesi. La metà del 74 è in Italia e l'altra metà in Francia.

1. $\text{arr} = \text{arr} + 1$ if $\text{arr} \geq 0$ and $\text{arr} \leq 100$ and $\text{arr} \leq 100$ and $\text{arr} \leq 100$
2. $\text{arr} = \text{arr} + 1$ if $\text{arr} \geq 0$ and $\text{arr} \leq 100$ and $\text{arr} \leq 100$ and $\text{arr} \leq 100$
3. $\text{arr} = \text{arr} + 1$ if $\text{arr} \geq 0$ and $\text{arr} \leq 100$ and $\text{arr} \leq 100$ and $\text{arr} \leq 100$
4. $\text{arr} = \text{arr} + 1$ if $\text{arr} \geq 0$ and $\text{arr} \leq 100$ and $\text{arr} \leq 100$ and $\text{arr} \leq 100$

IV. DISCUSSIONS

En ce qui concerne les précipitations, leur interception par les arbres varie en fonction de leur intensité et de la taille du houppier (BOFFA, 2000). L'interception sera d'autant plus importante que la pluie est moins violente et le vent plus faible. Au cours de l'essai, la quantité de pluie reçue au sol sous houppier a été augmentée de 10,3% sous le houppier en balai et diminuée de 12% sous le houppier en boule. Cette différence entre les houppiers peut être en partie attribuée à l'orientation des vents dominants par rapport à la position des pluviomètres ou à la nature des deux types de houppier. Selon RUYSEN (1957) le houppier en balai est généralement plus aéré et plus perméable à l'eau que le houppier en boule qui semble beaucoup plus compact et moins perméable à l'eau. BALDY et STIGTER (1993) rapportent que la pluie interceptée par les organes aériens peut s'égoutter avec un retard plus ou moins important. L'égouttage se fera plus rapidement lorsque le houppier est moins dense et plus lentement lorsque le houppier est plus compact. Ce dernier cas s'accompagne généralement d'un ruissellement d'eau le long des branches et des troncs jusqu'au sol. Ces auteurs soulignent que cette distribution de la pluie au voisinage des troncs assure une suralimentation localisée du sol en eau.

Ce phénomène s'est traduit au cours de l'essai par une nette amélioration de l'humidité du sol sous les houppiers qu'en dehors du houppier. L'humidité accrue sous les houppiers peut en outre être attribuée à l'effet d'ombrage qui selon JONSSON (1995) contribue à modérer la température ambiante et à augmenter l'humidité de l'air. Cet effet d'ombrage permet de réduire l'évaporation du sol et la transpiration des cultures sous-jacentes. Toutefois, au fur et à mesure que les pluies se raréfient, le déficit de pression de vapeur d'eau augmente et l'humidité du sol sous houppier diminue.

L'excès de l'humidité du sol et l'insuffisance de l'éclairement sous houppier ont par ailleurs entraîné un mauvais développement des plants de maïs. La hauteur et le nombre de feuilles par plante ont été relativement plus élevés en dehors du houppier que sous le houppier. Cet écart entre les deux milieux s'explique en partie par la modération des températures sous l'effet d'ombrage. Selon BONHOMME (1984) l'émission des feuilles de maïs est beaucoup influencée par la température de l'air et celle du sol. Dans un milieu où la température du sol est plus basse que celle de l'air, le rythme d'apparition des premières feuilles est très lent. Ce rythme est souvent à l'origine de la réduction de la hauteur des plants.

La photosynthèse, facteur primaire de la production totale en matière végétale, constitue un meilleur indicateur du fonctionnement hydrique de la plante au cours d'une sécheresse. Pendant les poches de sécheresse, le maïs régule ses pertes en eau par la fermeture des stomates ou par réduction de ses surfaces transpirantes en enroulant ses feuilles (HEMA, 1990). Cette régulation influe sur la photosynthèse. Selon ROBELIN (1984) la diminution de la perméabilité aux gaz de la feuille à la suite de la fermeture des stomates freine l'entrée du gaz carbonique et par conséquent réduit l'activité photosynthétique. Les résultats obtenus au cours de cette étude révèlent que le taux d'assimilation chlorophyllienne sous le houppier est significativement moins élevé que le taux hors houppier. Ce niveau bas du taux d'assimilation constaté sous les houppiers ne peut être attribué à l'effet d'un déficit hydrique car sous les karités, le sol est resté constamment humide pendant une bonne partie de la saison. Il peut être dû à l'effet d'ombrage. En effet, selon des auteurs (KESSLER, 1992 ; BAYALA et al. 2002), la réduction de la production de la matière sèche sous les arbres serait en partie due à l'insuffisance de la quantité d'éclairement. Au cours de la croissance et du développement du maïs on constate que la demande d'assimilats se modifie sans cesse. Elle se trouve particulièrement plus

élevée à la floraison (40 JAS) et plus faible à la maturation (60 JAS). Selon PRIOL (1984), cette demande en phase de reproduction est due à la mise en place de certains organes (tige, spathes, rafles) qui vont servir de réservoirs pour alimenter les épis au cas où l'approvisionnement serait défaillant au niveau des feuilles. La baisse du taux d'assimilation à 60-JAS peut être attribuée à la contrainte hydrique observée au moment de la maturation et dans ce cas, la plante met à profit ses réservoirs afin d'assurer le remplissage de l'épis.

Concernant la productivité, les résultats ont révélé que le poids des grains, le poids des tiges et celui des épis ont été significativement plus élevés dans les zones hors houppier que sous houppier. Le rendement du maïs a été réduit de 35% sous le port en balai contre 54% sous le port en boule. On remarque que malgré l'importance de l'humidité et la fertilité du sol sous les houppiers, la production du maïs est restée bien inférieure à celle relevée hors houppier. Des observations semblables ont été faites sur une culture de sorgho associée au néré et au karité où les rendements avaient fléchi dans les parcelles sous houppier (MAIGA, 1987, KESSLER, 1992). Ces auteurs soulignent que cette diminution de rendement est fortement corrélée à une diminution régulière de l'intensité lumineuse constatée sous les arbres.

CONCLUSION

Il ressort de ce travail que la présence du karité dans les parcelles agricoles crée un environnement agroécologique favorable à la croissance des cultures. Sous les karités, bien qu'une partie des précipitations soit interceptée par le houppier, le taux d'humidité du sol est resté plus élevé dans le temps, par rapport à celui du sol hors houppier. Cette humidité accrue du sol sous les houppiers a permis de réduire le stress hydrique du maïs à la maturation des grains, période au cours de laquelle les pluies étaient rares et insuffisantes. L'étude a aussi révélé que l'accumulation de la litière sous le karité a permis d'améliorer le niveau de fertilité des sols. Cet effet bénéfique sur le sol n'a cependant pas pu combler les effets négatifs de l'ombrage induits par les houppiers puisque la croissance et la productivité du maïs sont demeurées moins bonnes sous le karité qu'à découvert. L'effet d'ombrage a contribué également à réduire l'activité photosynthétique sous les karités.

Lorsqu'on analyse les composantes de rendement en relation avec les différents ports du karité, on peut affirmer que l'ombrage des houppiers en balai affecte moins la baisse la croissance et la productivité du maïs que celui des houppiers en boule. Dans les zones sous influence de l'ombrage le matin ou l'après-midi,

les rendements ont certes été réduits mais pas de façon significative par rapport à la zone hors houppier,

Dans cette étude, nous avons cherché à comprendre le comportement d'une culture de maïs en situation de contrainte hydrique naturelle dans une association avec le karité. mais, la bonne pluviométrie constatée cette année, a réduit la durée de la contrainte hydrique au moment de la floraison et de la maturation du maïs. Les résultats que nous avons obtenus l'ont donc été dans des conditions de sécheresse modérée.

Remerciements

Nous exprimons notre sincère reconnaissance au CERAAS pour nous avoir associés à leur programme de recherche : nous remercions l'Association des Universités Africaines (AUA) qui a financé notre équipement et nos activités de recherche.

BIBLIOGRAPHIE

- BALDY C. et STIGTER C.J., 1993. Agronôméologie des cultures multiples en régions chaudes. INRA, Paris, 246p.
- BAYALA J., TEKLEHAIMANOT Z. and OUEDRAOGO J.S., 2002. Millet production under pruned tree crowns in a parkland system in Burkina Faso. *Agroforestry Systems*, 54, 203-214.
- BOFFA J.M., 1995. Productivity and management of agroforestry parklands in the Sudan Zone of Burkina Faso, West Africa. Ph.D. Thesis, Purdue Univ. USA, 99p.
- BOFFA J.M., 2000. Les parcs agroforestiers en Afrique subsaharienne. *Cahier FAO conservation*, 34, 258p.
- BONHOMME R., 1984. Fonctionnement photosynthétique du couvert végétal. In : *Physiologie du maïs*, INRA, Paris, pp 147-162.
- BUNASOL, 1987. Méthodes d'analyse physiques et chimiques des eaux et du sol. Document technique n°3, 159p.
- DIAKITE I., 1995. Concurrence pour l'eau et les éléments nutritifs du sol entre ligneux et cultures. Le karité et le sorgho en zone semi-aride au Mali. Mémoire M.Sc. Univ. Laval, Québec, Canada, 69p.
- FAO, 2000. Annuaire FAO de la production. Collection FAO statistique, 163, 71-83.
- GOUNOT M., 1969. Méthodes d'étude quantitative de la végétation. Edt. Masson et Cie. Paris, 305p.
- HEMA I., 1990. Adaptation à la sécheresse du maïs. Rapport CERAAS, 10p.
- HEMA D., 1994. Etude de la résistance à la sécheresse chez le maïs (*Zea Mays L.*). Analyse de la variabilité génétique de quelques caractères agrophysiologiques. Thèse Doct. Univ. Nat. de Côte d'Ivoire, 151p.
- INERA, 1993. Caractérisation des stations de recherches agronomiques de Di, Katchari et Kouaré. Rapport technique, pp 69-82.
- JONSSON K., 1995. Agroforestry in dry savanna areas in Africa : interactions between trees, soils and crops. Ph.D. Dissertation Swedish Univ. of Agricultural science, Umea, Sweden, 92p.
- JONSSON K., ONG C.K. and ODONGOS J.C.W., 1999. Influence of scattered nere and karité on microclimate, soil fertility and millet yield in Burkina Faso. *Experimental Agriculture*, 35, pp 39-53.
- KESSLER J.J., 1992. The Influence of karité (*Vitellaria paradoxa*) and néré (*Parkia bigobosa*) trees on sorghum production in Burkina Faso. *Agroforestry systems*, 7, pp 97-118.
- MAIGA A., 1987. L'arbre dans les systèmes agroforestiers traditionnels dans la province du Bazèga. Influence du karité, du néré et de *Acacia albida* sur le sorgho et le mil. Rapport de stage. IRSET/CNRST Ouagadougou, 86p + annexes.
- NYBERG G. and HÖGBERG P., 1995. Effects of young agroforestry trees on soils in farm situations in Western Kenya. *Agroforestry Systems*, 32, 145-152.
- OUEDRAOGO M., 2000. Etude biologique et physiologique du *Jatropha curcas L.* Thèse d'Etat. Univ. de Ouagadougou, 289 pages.
- PRIOLU J.L., 1984. Transport et distribution des assimilats chez le maïs : mécanisme, rôle des facteurs externes. In : *Physiologie du maïs*, INRA, Paris, pp 303-319.
- ROBELIN M., 1984. Fonctionnement hydrique et adaptation à la sécheresse. In : *Physiologie du maïs*, INRA, Paris, pp 445-476.
- RUYSSEN B., 1957. Le karité au Soudan. *Agronomie tropicale*, vol. XI, n° 2, 144-172 ; vol. XII, n° 3, 279-306 ; vol. XII, n° 4, 415-438.
- RONDEUX J., 1993. Les mesures des arbres et des peuplements forestiers. Eds les Presses agronomiques de Gembloux, 521p.
- SINCLAIR F.L., 1999. A general classification of agroforestry practice. *Agroforestry Systems*, 46, 161-180.
- SIVAKUMAR M.V.K. and GNUMOU F., 1987. Agroclimatology of West Africa. Burkina Faso. ICRISAT information bulletin, 23, 1-62.
- SOME L., 1989. Diagnostic agropédologique du risque de sécheresse au Burkina Faso. Etude de quelques techniques agronomiques améliorant la résistance pour les cultures de sorgho, de mil et de maïs. Thèse Doct. Univ. Montpellier II, 213p.
- YOUNG A., 1986. Effects of trees on soils. In : *Amelioration of soil by trees*, R.T. PRINSLEY and M.J. SWIFT. Eds. Commonwealth Science Council, London, pp 10-15.

