

**UNIVERSITE ABDOU MOUMOUNI
NIAMEY NIGER**



NUMERO DE SERIE
HABILITATION A DIRIGER DES RECHERCHES (HDR)
DISCIPLINE : AGROPHYSIOLOGIE



Présentée par DAOUA OUSMANE Sani
Chargé de Recherche
Devant l'Université Abdou Moumouni de Niamey en vue de
l'obtention du Grade d'Habilitation à Diriger des Recherches

Contribution à l'Amélioration de la Productivité du Mil en
Conditions contraignantes du Sahel

Soutenue le 21 Décembre 2017 devant le Jury composé de :

M. ADAM Toudou, Professeur Titulaire, Université Abdou Moumouni	Président
M. BARAGE Moussa, Professeur Titulaire, Université Abdou Moumouni	Directeur de Thèse
M. SIDIBE Abdoulaye, Professeur Titulaire, IPR/IFRA Katibougou Mali	Rapporteur
M. AMOUKOU A. Ibrahim, Maître de conférences, Université Abdou Moumouni	Rapporteur

*A la mémoire de mon père
A ma mère, ma femme, mes enfants
A tous ceux qui me sont chers*

REMERCIEMENTS

Je tiens tout d'abord à remercier particulièrement le Professeur ADAM Toudou, qui était déjà là à ma précédente étape d'inscription au grade de Chargé de recherche, il m'a accompagné le long de toutes ces années et me fait aujourd'hui le grand plaisir d'être le Président de Jury.

Je remercie très particulièrement le Professeur BARAGE Moussa, ancien Vice-Recteur à la Recherche et aux Relations Extérieures, et Directeur des laboratoires de Biotechnologie de l'UAM, qui a accepté de superviser ce travail et m'a donné des conseils très précieux à la fois sur la préparation de ce mémoire, mais aussi tout au long de ces années de recherche. C'est un grand honneur de l'avoir dans mon jury. Qu'il trouve ici, l'expression de ma très grande reconnaissance.

Je remercie très vivement le Professeur SIDIBE Abdoulaye et M. AMOUKOU Ibrahim, Maître de Conférences, qui ont répondu très positivement à ma demande pour être rapporteurs dans cette HDR. C'est un honneur pour moi de les avoir dans mon jury. Encore Merci.

Les travaux présentés dans ce mémoire de HDR sont les résultats d'un travail collectif et d'une collaboration avec mes collègues de laboratoires nationaux et étrangers, ainsi que des jeunes chercheurs doctorants et de Master. Je souhaite les remercier très sincèrement, car sans leurs aides et leurs implications, ce travail n'aurait jamais été aussi large et agréable.

L'organisation de la soutenance de cette HDR a été rendue possible grâce à l'appui financier de l'Université Abdou Moumouni de Niamey à travers l'Institut des Radio-Isotopes. C'est ici le lieu de remercier très sincèrement les autorités rectorales, en la personne du Pr HABIBOU Abarchi et le Directeur de l'IRI le Dr ADAM Ali.

Je n'oublie pas bien sûr tous mes collègues Chercheurs et Personnel Administratifs et Techniques de l'IRI qui m'ont aidé tout le long de ces années. Qu'ils trouvent ici le témoignage de toute ma gratitude. Ce travail est aussi le leur.

La rédaction de ce mémoire pour partie à Ouagadougou, au Burkina Faso, a été facilitée par un appui financier du Programme de Productivité Agricole en Afrique de l'Ouest (PPAAO). Je voudrais exprimer ma profonde gratitude au Pr SOUMANA GOURO Abdoulaye et Mme

Mary Altiné, respectivement Coordonnateur et Coordonnatrice-Adjointe du projet PPAAO.

Enfin, ma reconnaissance et mes vifs remerciements vont à ma femme Rabi ISSAKA, mon petit frère ISSA Laminou et mes enfants HALIMA, ABDOUL-RAZAK, MIDJITAPHA, HADJARA, ABDOUL-RACHID et ASSAMAOU pour leurs encouragements, leur patience, leur soutien et leur support tout au long de ma carrière malgré mes absences répétées, en particulier durant la préparation de ce mémoire.

Contenu	
Remerciements	3
Cigles et Abréviations	7
Résumé	9
ABSTRACT	10
Introduction générale.....	11
Partie 1 : Synthèse des travaux de recherche	16
1.1 Présentation du contexte général des Travaux.....	17
1.2 Mécanismes de tolérance à la sécheresse chez le mil (<i>Pennisetum glaucum</i> (L.) R. Br.)	18
1.3 Amélioration de la réserve en eau et en éléments minéraux du sol	21
1.4 Traitement des états de surface et amélioration de l'infiltration des eaux de pluie en sol de glacis.....	23
1.5. Gestion intégrée de l'eau et des éléments minéraux.....	23
1.6 Quantification des flux d'eau et de minéraux en profondeur et prévention de l'environnement.....	24
1.7 Amélioration de la tolérance à la sécheresse chez le mil.....	25
1.7.1 Caractérisation de la radio-sensibilité du mil (et du niébé)	26
1.7.2 Screening des mutants tolérants à la sécheresse.....	28
Conclusion.....	29
Partie II : Analyse des travaux.....	30
Chapitre 1 : mécanismes agrophysiologiques de tolérance à la sécheresse chez le mil	31
1.1 Introduction	32
1.2. Mécanismes agrophysiologiques de résistances à la sécheresse chez le mil	35
1.3. Méthode d'estimation de la biomasse racinaire sous le poquet	54
1.4. Conclusion partielle.....	65
Chapitre 2 : Amélioration de la Nutrition Hydrique et Minérale des Plantes	69
2.1. Introduction	70
2.2. Amélioration des pratiques de la gestion de l'eau et de la fertilité du sol.....	71
2.3. Développement d'une méthode d'évaluation de la recharge en eau de la nappe phréatique par les eaux de pluies ou d'irrigation.....	83
2.4. Gestion intégrée de l'eau et des engrais dans la Basse vallée de la Tarka (BVT)	96
2.5. Valorisation du Phosphate naturel de Tahoua	110
2.6. Devenir de l'azote dans le système de culture mil-niébé sur sol sableux au Niger	127
2.7 Conclusion partielle.....	141
Chapitre 3 : Contribution à l'Amélioration de la tolérance à la sécheresse chez le Mil	143

3.1. Introduction	144
3.2 Radiosensibilité du Mil au rayonnement gamma	145
3.3. Réponse <i>in vitro</i> du mil à la sécheresse	153
3.4. Conclusion partielle.....	160
4. Conclusion Générale et perspectives	161
Partie III : Formation-Activités Institutionnelles et Pédagogiques	165
Chapitre 4 : Curriculum vitae détaillé	166
4.1 Fonction actuelle.....	167
4.2 Responsabilité et Mandat électif	167
4.3 Domaines de Recherche :	168
4.4 Rayonnement scientifique.....	168
4.5 Formation.....	168
4.6 Encadrement de Recherche.....	169
4.7 Publications et travaux divers	173
4.8 Gestion des Projet de recherche.....	176
4.9 Activités Institutionnelles	178
4.10 Activités d'enseignement	180
4.11 Conclusion.....	184
REFERENCES	185
Annexes	190
ANNEXE 1 : Schéma explicatif fonctionnement hydrique IC30	191
ANNEXE 2 : Schéma explicatif fonctionnement hydrique HKP.....	192

CIGLES ET ABREVIATIONS

AIEA : Agence Internationale pour l'Energie Atomique

AFRA : *African Regional Agreement for Nuclear Sciences and Technology*

BVT : Basse Vallée de la Tarka

CADELT : Cellule d'Appui au Développement Local de Téra

CAN : Calcium Ammo-Nitrate

CEA : Commissariat à l'Energie Atomique (français)

CERAAS : Centre d'Etude Régional pour l'Amélioration de l'Adaptation à la sécheresse

CRU : Coefficient Réel d'Utilisation

Cu : Cuivre

DAA : Diplôme d'Agronomie Approfondie

DAS : *Day After Sowing*

ETM : Evapotranspiration maximale

ETP : Evapotranspiration Potentielle

ETR: Evapotranspiration Réelle

FAO : *Food and Agricultural Organization*

Fe : fer

GAEC : *Ghana Atomic Energy Commission*

HAPEX SAHEL: *Hydrology-Atmosphere Pilot Experiment in the Sahel*

HDR : Habilitation à Diriger des recherches

ICRISAT: *International Crop Research Institute for the Semi-Arid and Tropic*

INRAN : Institut National pour la Recherche Agronomique du Niger

IRD : Institut de Recherche pour la coopération en Développement

IRI : Institut des Radio-Isotopes

LABAP : Laboratoire de Biotechnologie et Amélioration des Plantes

LD₅₀: *Lethal Dose for 50% growth inhibition*

MPa : *Mega Pascal*

MRST: *Ministère (français) de la Recherche Scientifique et de la Technologie*

Ndff : *Nitrogen derived from fertilizer*

ORSTOM : *Office de Recherche Scientifique pour les Territoires d'Outre-Mer (Actuel IRD)*

Pdff : *Phosphate derived from fertilizer*

Pdfr: *Phosphate derived from Rock*

Pdfs : *Phosphate derived from soil*

PEG : polyéthylène glycol

PPAAO/WAAPP : Programme de Productivité Agricole en Afrique de l'Ouest/ *West Africa Agricultural Productivity Programme*

PVC : *Poly Vinyl Chlorid*

SSP : *Single Super Phosphate*

TRP : Tahoua Rock Phosphate

UAM : Université Abdou Moumouni

ULB : Université Libre de Bruxelles

Zn : Zinc

RESUME

L'agriculture au XXI^e siècle est confrontée à de multiples défis. Les changements climatiques et l'accroissement de la population mondiale font assurément partie des plus déterminants de ces défis. Le poids de la démographie sur l'agriculture est une réelle source d'inquiétude pour le futur. Des taux record d'accroissement de la population sont malheureusement enregistrés en Afrique sahélienne, où les conditions d'humidité déjà limites se dégradent d'avantage à cause de la montée de l'évaporation provoquée par la hausse des températures. Ceci constitue une sérieuse menace pour la sécurité alimentaire, pour ces populations pauvres qui vivent presque exclusivement de l'activité agricole. Le mil (*Pennisetum glaucum* (L.) R. Br.) constitue l'une des bases alimentaires dans ces zones arides et semi-arides tropicales, régions où les conditions climatiques ne permettent à aucune autre céréale de se développer normalement. Aider le mil à mieux s'adapter aux effets des changements climatiques, s'impose comme stratégie de sécurisation alimentaire de ces populations.

Au Département de Radio-Agronomie et Ecophysiologie Végétale de l'Institut des Radio-Isotopes, ont eu lieu d'importants travaux de recherche pour l'amélioration de la productivité du mil en milieu contraignant. L'amélioration des conditions de la nutrition hydrique et minérale a été développée grâce aux techniques de marquage isotopique, pour les éléments minéraux, et à l'humidimétrie neutronique pour le bilan hydrique. Il ressort que moins de 30% des engrais chimiques apportés aux sols sableux dunaires du Sahel sont réellement utilisés par la culture et que la gestion de la fertilité doit s'axer sur des méthodes innovantes pour augmenter la capacité de stockage des sols. Des risques réels de pollution des sols et des nappes peu profondes ont été mis en évidence avec la mise en irrigation des terres de vallée. Une méthode d'amélioration de la tolérance à la sécheresse des plantes, par la mutagenèse induite a été développée et appliquée sur le mil avec succès.

Mots clés : mil; tolérance à sécheresse; fertilité des sols ; mutagenèse induite ; Niger

ABSTRACT

Agriculture in the 21st century faces multiple challenges. Climate change and the growing world population are certainly among the most important of these challenges. The weight of demography on agriculture is a real source of concern for the future. Record high population growth rates are unfortunately recorded in Sahelian Africa, where already limited moisture conditions are deteriorating further due to rising evaporation caused by rising temperatures. This poses a serious threat to food security for those poor people who live almost exclusively from farming. Pearl Millet (*Pennisetum glaucum* (L.) R. Br.) is one of the food bases in these arid and semi-arid tropical areas, where climatic conditions do not allow any other cereal to develop normally. Helping millet to better adapt to the effects of climate change is essential as a food security strategy for these populations.

In the Department of Radio-Agronomy and Plant Ecophysiology of the Institute of Radio-Isotopes, important research has been carried out to improve millet productivity in a constraining environment. Improved approaches for water and mineral plant nutrition were developed using isotopes labeling techniques for nutrients and neutron moisture analysis for the water balance. It appears that less than 30% of the chemical fertilizers applied to the sandy soils of the Sahel are really used by the crop and that the fertility management must be based on innovative methods to increase the storage capacity of the soil. Real risks of pollution for the soils and shallow aquifers have been identified with the introduction of irrigation in valley lands. A method of improving the drought tolerance of plants by induced mutagenesis has been developed and applied to millet successfully.

Keywords: Pearl millet; drought tolerance; soil fertility; induced mutagenesis; Niger

INTRODUCTION GENERALE

L'agriculture au XXI^e siècle est confrontée à de multiples défis: elle doit produire plus de nourriture et de fibres pour nourrir une population croissante avec une main-d'œuvre rurale plus réduite, fournir plus de matières premières pour un marché potentiellement énorme de la bioénergie, contribuer au développement global de nombreux pays en développement, adopter des méthodes de production plus efficaces et plus durables et s'adapter au changement climatique (FAO, 2009). La population mondiale croît, en même temps que ses besoins. L'essentiel de cette croissance vient des pays en développement, en particulier ceux de l'Afrique subsaharienne. Le poids de cette démographie sur l'agriculture est une réelle source d'inquiétude pour le futur. Comme conséquence des changements climatiques en cours, il est attendu de la sécheresse un impact majeur pour une partie importante de la planète, sous les tropiques comme en zones tempérées (en Europe et en Amérique du Nord). La disponibilité d'eau douce, en quantité et en qualité, qui est une condition essentielle pour toutes les formes d'agriculture est une source de préoccupation primordiale pour le proche avenir. La production agricole utilise 80-90% de l'eau douce utilisée par l'homme (Hamdy *et al.*, 2003). Les surfaces sous la sécheresse augmenteraient à cause de la montée de l'évaporation provoquée par la hausse des températures. Les phénomènes de sécheresse sont de plus en plus fréquents, très variables dans leur durée et dans leur intensité. Les régions les plus touchées sont celles où les réserves en eau du sol sont déjà limitées, à savoir les régions tropicales et subtropicales (Scheff and Frierson, 2012 ; Solomon *et al.*, 2007 ; Niel *et al.*, 2005). Ces régions connaissent une situation alimentaire déjà précaire, et cela risque de s'aggraver au vue de la tendance actuelle de croissance accélérée de leur population (Alexandratos and Bruinsma, 2012). Ceci constitue une sérieuse menace pour la sécurité alimentaire, dans la mesure où ces populations sont pauvres et vivent presque exclusivement de l'activité agricole.

La pression démographique entraîne une pression sur la terre et diminue la durée de la jachère et son efficacité. La fertilité des sols en est négativement affectée, de même qu'une expansion de l'aire des cultures sur des terres marginales classées inaptes à l'agriculture. Près de la moitié des terres agricoles souffrent d'érosion et de baisse de fertilité dans les zones arides et semi-arides en Afrique (Floret *et al.*, 1993). Il est difficile d'imaginer qu'une réduction significative de la pauvreté puisse se produire sans un secteur agricole dynamique qui offre des revenus, de l'emploi et des produits de base abordables. Les rendements céréaliers en Afrique sont de moitié inférieurs à la moyenne mondiale.

Le mil (*Pennisetum glaucum* (L.) R. Br.) constitue la base alimentaire de quelque 200 millions d'habitants des zones arides et semi-arides tropicales, régions où les conditions climatiques ne permettent à aucune autre céréale de se développer normalement. Sa culture couvre plus de 20 millions d'hectares répartis principalement en Afrique et en Asie, pour une production totale de 16 millions de tonnes (FAOSTAT, 2015). Au Niger, le mil est la base alimentaire des populations. Il représente 75% des céréales consommées, avec un niveau de consommation de 163 kg par habitant par an. Malheureusement le rendement du mil est encore en stagnation et l'augmentation de la production se fait par le biais de l'extension des superficies cultivées. Les contraintes en terre devenant de plus en plus aigües, il est urgent de trouver de nouvelles voies pour augmenter la productivité dans les conditions contraignantes du Sahel, dans l'espoir d'un minimal de sécurité alimentaire.

De façon générale, le terme "mil" regroupe un ensemble de graminées alimentaires annuelles qui ont pour caractéristique commune, la petitesse de leurs graines. La classification taxonomique actuelle pour le mil est basée sur Clayton (1972), revue par De Wet (1977). Le mil appartient à la famille des *Poaceae*, Sous-famille des *Panicoideae*, Tribu des *Paniceae*, Sous-tribu des *Panicinae*, Section des *Panicillaria*, Genre-*Pennisetum* et Espèce-*glaucum*. Le genre *Pennisetum*, qui est le plus grand genre de la tribu des *Paniceae*, a cinq sections (*Penicillaria*, *Gymnothria*, *Eupennisetum*, *Heterostachy* et *Brevivalvula*) et environ 140 espèces (Stapf et Hubbard, 1934). *P. glaucum* (*P. americanum* selon d'autres auteurs) est divisé en trois sous-espèces: (a) *Glaucum*-comprenant des espèces cultivées, (b) *violaceum* (*monodii*)– comprenant des espèces sauvages; et (c) *sténostachyum* – rassemblant toutes les espèces intermédiaires produits d'hybridation naturelle entre *glaucum* et *violaceum*.

Le Nigeria, le Niger, le Burkina Faso, le Mali, le Sénégal et le Soudan en sont les principaux pays producteurs. Le grain de mil a une valeur nutritionnelle équivalente ou supérieure à celle de la plupart des grandes céréales du monde. Il a des teneurs élevées en acides aminés essentiels dont la méthionine, la cystine. C'est une source unique en pro-vitamine A et en micronutriments (Zn, Fe et Cu). Cependant, le commerce international du mil porte sur moins de 1% de la production totale.

Des travaux d'amélioration du mil ont débuté avant les indépendances et se sont principalement orientés vers l'obtention d'une production améliorée et durable, ainsi qu'une meilleure gestion des ressources génétiques. Les efforts en termes d'amélioration de la tolérance à la sécheresse ont été surtout orientés vers le développement de variétés précoces à floraison synchronisée (Saïdou *et al.* Al., 2009 ; Mariac *et al.*, 2010). Les changements

climatiques en cours se traduisent par une mutation dans le type de sécheresse, avec des intensités, des durées et périodes très variables qui imposent de développer de nouvelles méthodologies et de nouvelles variétés adaptées aux nouvelles situations.

Ce document, présenté en vue de l'obtention d'une Habilitation à Diriger des Recherches (HDR), synthétise nos activités de recherche et d'enseignement, et ce depuis vingt-huit ans. Ces activités de recherche sont menées à l'Institut des Radio-Isotopes (IRI), au sein du Département de Radio-Agronomie ; d'abord dans le Laboratoire de Fertilité des Sols et en suite dans le Laboratoire de Biotechnologie Végétale et Amélioration des Plantes (LABAP). Les activités d'enseignement quant à elles, s'effectuent au sein du Département de Production Végétale de la Faculté d'Agronomie de l'Université Abdou Moumouni de Niamey (UAM).

Nos premiers contacts avec la recherche datent de 1984. Nous effectuons alors notre stage de maîtrise en Agronomie Générale. Nous avons travaillé sur l'effet de **l'hétérogénéité spatiale des paramètres du sol sur la variation des rendements des cultures à petites échelles**. La question de la distribution spatiale de l'humidité du sol a marqué notre attention. Par la suite nous avons suivi une formation d'ingénieur Agronome, qui nous a permis d'obtenir en même temps un Diplôme **d'Agronomie Approfondie en Génie Rural et des Procédés, option Sciences du Sol et du Bioclimat**, à l'Ecole Nationale Supérieure Agronomique de Rennes en France. Ainsi, nous avons été recruté à l'Université de Niamey, en tant qu'Attaché de recherche pour servir au Département de Radio-Agronomie de l'Institut des Radio-Isotopes, en Décembre 1987.

Notre thème de mémoire pour le DAA a porté sur la contribution pour la mise au point d'un « **système expert** » pour le **pilotage automatique de l'irrigation du Maïs grain** en Limagne, basé sur l'évolution de la tension de l'eau du sol. Ceci a davantage renforcé notre intérêt sur les relations « Sol-Plante-Atmosphère » et l'impact de la disponibilité de l'eau sur les rendements des cultures. Et notre sujet de **Thèse Unique** « *Comportement hydrique de cultivars de mil (Pennisetum typhoides) en conditions pédoclimatiques contraignantes : réactions de la plante entière à un stress hydrique post-floral* » illustre bien cet intérêt tout en mettant l'accent sur les principaux handicaps que connaissent les populations nigériennes : la sécheresse et l'insécurité alimentaire. Cette thèse qui devait permettre de comprendre les mécanismes développés par le mil (une plante alors considérée comme tolérante à la sécheresse) face au stress hydrique, a permis de dégager deux types de comportements avec chacun des avantages et des inconvénients. Cette thèse a permis de constater d'importantes

lacunes liées aux méthodes classiques d'amélioration des cultures sahéliennes, notamment la recherche du raccourcissement du cycle végétatif pour s'adapter à la longueur de la saison humide. Les changements climatiques en cours entraînant l'accentuation des irrégularités des pluies, mêmes les espèces dites tolérantes comme le mil nécessitent l'amélioration de leur aptitude à supporter les stress. Voilà la nouvelle ligne de recherche après la thèse et qui a fait l'objet de plusieurs publications.

Ainsi, depuis notre recrutement comme Attaché de recherche au Département d'Agronomie Nucléaire de l'Institut des Radio-Isotopes à l'Université Abdou Moumouni de Niamey, nous avons développé une expérience avérée en bilan hydrique et valorisation des réserves en eau du sol pour les cultures sèches. Le contexte de désertification et de famines plus ou moins récurrentes grandissant au Sahel, nos travaux se sont élargis à l'Amélioration de la productivité des cultures en conditions contraignantes, sujet sur lequel nous avons soutenu notre Thèse. Nous avons aussi bénéficié de larges expériences des laboratoires du Commissariat à l'Energie Atomique français, Direction des sciences du vivant, département Ecophysiologie Végétale sous la responsabilité de Pierre Moutonnet, Directeur de Recherche, spécialiste du bilan minéral en sol cultivé, et de Jean Thiéry, spécialiste de la modélisation des écosystèmes cultivés. Nous avons également travaillé avec les équipes du Centre d'Etude Régional pour l'Amélioration de l'Adaptation à la sécheresse (CERAAS) sur les mécanismes de réponse au stress hydrique des céréales avec Monsieur Daniel ANNEROSE.

Dernièrement nous avons développé une nouvelle approche pour l'amélioration de la tolérance à la sécheresse sur le mil et les cultures associées, en collaboration avec l'Université Libre de Bruxelles et le Ghana Atomic Energy Commission.

C'est donc un total de plus de 28 ans de recherche sur l'amélioration de la productivité en conditions contraignantes que nous souhaitons mieux valoriser et compiler en un document d'HDR.

Vu le nombre relativement important d'encadrement et de co-encadrement de mémoires de master et de publications scientifiques, nous présenterons dans ce mémoire, les travaux ayant trait spécifiquement à l'amélioration de la culture du mil, principale base alimentaire des populations nigériennes.

Ce mémoire est organisé en deux principales parties :

La première partie porte sur la synthèse de nos activités de recherche, leur positionnement scientifique ainsi que les perspectives à court, moyen et long termes. L'ensemble des

thématiques que nous avons eu l'occasion d'aborder ont été détaillées. Les activités de recherche avant, pendant et après la Thèse ainsi que les perspectives sont présentées.

La deuxième partie est consacrée à la présentation de notre parcours. Cette partie présente notre *Curriculum vitae* détaillé, qui fournit une synthèse de notre parcours professionnel jusqu'à aujourd'hui. Dans cette partie sont également listés les étudiants encadrés et les articles publiés.

Les travaux de recherche présentés dans ce mémoire sont les résultats de travaux de recherche collaborative, avec d'autres chercheurs qui ont beaucoup contribué au développement des idées et de la réflexion scientifique.

PARTIE 1 : SYNTHÈSE DES TRAVAUX DE RECHERCHE

1.1 PRESENTATION DU CONTEXTE GENERAL DES TRAVAUX

En Afrique au Sud du Sahara et particulièrement au Sahel, l'histoire des crises alimentaires est très ancienne (Alpha Gado, 1993 ; Giri, 1994). Avant les indépendances, elles étaient surtout liées aux régimes de guerres, aux invasions acridiennes, aux sécheresses et même aux inondations en années humides. Aujourd'hui encore, le contexte est loin d'offrir les conditions favorables à l'éradication de la famine au Sahel (Amadou, 2005). La situation est telle que la famine est devenue presque endémique, les déficits alimentaires et fourragers sont réguliers et fréquents et les années excédentaires sont de plus en plus rares.

Au plan pédologique, le Niger se caractérise par une dominance de sols peu fertiles, avec des faibles teneurs en matière organique qui limitent fortement la productivité des cultures (Moussa, 2013). L'agriculture est encore au stade de subsistance. Elle est essentiellement tributaire de la pluviométrie. Les proportions des superficies irriguées restent encore dérisoires, malgré un récent regain d'intérêt lié à la politique de culture dite de contre-saison. La consommation des intrants agricoles est fortement limitée par l'extrême pauvreté des populations rurales. La production agricole nationale augmente grâce à l'extension des superficies cultivées, ce qui devient de moins en moins possible à cause de la forte saturation des terres liée au fort taux de croissance de la population de 3,9% l'an.

Le climat est dominé par son extrême aridité caractérisée par des périodes de sécheresse de plus en plus larges et de plus en plus fréquentes. Les changements climatiques, reconnus comme une réalité objective (Stiluna and Solodkiy, 2015 ; Ifeanyieze *et al.*, 2016) se traduisent, en régions arides et semis arides, par la hausse des températures du sol et de l'air, l'augmentation des fréquences des phénomènes météorologiques extrêmes (sécheresses, inondations, tempêtes).

Le mil (*Pennisetum glaucum* (L.) R. Br.) est extrêmement important dans les zones arides et semi-arides et particulièrement au Niger, où il fournit l'essentiel des sources d'énergie et de protéines pour de nombreuses populations. Sur le plan nutritionnel, le mil est équivalent ou même souvent supérieur à la plupart des grandes céréales (Obilana et Manyasa, 2002). Il contient des niveaux élevés de méthionine, de cystéine et d'autres acides aminés vitaux pour la santé humaine. Le mil est considéré comme un aliment sain, principalement en raison du manque de gluten (une substance qui cause une maladie cœliaque) dans son grain. Le mil est une source unique de pro-vitamine A et de micronutriments (Zn, Fe et Cu). Malgré ces

multiples avantages, le mil bénéficie de très peu d'investissements pour la recherche et les rendements sont encore relativement très faibles par rapport à ceux des grandes céréales. Cependant, il est reconnu au mil sa remarquable adaptation aux environnements hostiles (précipitations faibles et irrégulières, températures élevées, faibles niveaux de fertilité des sols etc.) et ceci le place aujourd'hui au centre d'efforts majeurs de recherche et de développement agricole, face aux changements climatiques (Dangles *et al.*, 2009). En outre il est probable que les changements climatiques viennent accélérer le passage de nombreux territoires classés modérément affectés par l'aridité à sévèrement affectés et élargir les rangs des zones arides du monde (FAO, 2007). La question de la sécurité alimentaire dans un tel contexte devient une véritable préoccupation, le mil étant la seule culture pouvant encore tolérer ces conditions contraignantes. Le renforcement de son adaptation et de sa tolérance à ces conditions contraignante représente donc le passage obligatoire pour garantir la satisfaction de besoins alimentaires croissant dans les régions arides et semi-arides du monde.

Les travaux effectués à l'Institut des Radio-Isotopes (IRI) de l'Université Abdou Moumouni de Niamey, de 1988 à 2015, constituent une importante contribution à la résolution de ce paradoxe.

1.2 MECANISMES DE TOLERANCE A LA SECHERESSE CHEZ LE MIL (*Pennisetum glaucum* (L.) R. BR.)

Nous avons tenté, dans une première étape, de comprendre les mécanismes agro-morpho-physiologiques mis en œuvre par le mil, en réponse à la sécheresse. Nous avons choisi la sécheresse de fin de cycle qui est la plus impactante sur les rendements en grains. L'étude a été menée sur trois génotypes aux classements contrastés face au stress hydrique, et un mil sauvage (*Pennisetum violaceum* (Lam.) Rich). Cette espèce a finalement été écartée à cause de la déhiscence spontanée de ses épis et une phénologie nettement décalée par rapport aux espèces cultivées. De même les travaux préliminaires ayant montré la similarité de comportement entre les variétés ICMVIS 85327 et HKP, le travail a été centré sur les deux variétés ICMVIS 86330 (appelée ici IC30) et HKP.

Le dispositif expérimental est un essai factoriel à deux facteurs : hydrique (2 niveaux, irrigué ou stressé) et variétal (2 variétés), avec 4 répétitions. L'irrigation a été suspendue à partir de la floraison sur le bloc stressé. L'analyse des mécanismes agrophysiologiques mis en jeu par l'un

et l'autre des deux cultivars aiderait à comprendre le fonctionnement du mil face au stress hydrique et à en déduire certains caractères précurseurs "marqueurs" de la résistance à la sécheresse chez le mil. Des mesures phénologiques, physiologiques et agronomiques ont été réalisées trois fois par semaine, de la floraison à la récolte. A la lumière des résultats, les principales conclusions ont été tirées :

1. En terme d'Etat hydrique des deux cultivars, la contrainte hydrique s'est traduite par une baisse progressive du *potentiel foliaire*, du *contenu relatif en eau* et de la *conductance stomatique*. La baisse du potentiel foliaire a été plus rapide sur le cultivar HKP avec un écart de -0,5 MPa en fin d'expérience par rapport à IC30. Le *contenu relatif en eau (CRE)* était de 71% et 63%, respectivement pour IC30 et HKP à la fin de l'expérience. La baisse de la *conductance stomatique* intervient presque aussitôt après le début de la contrainte hydrique sur les plantes stressées. Le potentiel de -0,8 à -1 MPa correspond au seuil de déclenchement du mécanisme de régulation stomatique chez le mil. En termes d'état hydrique global, le cultivar IC30 a eu le meilleur état avec +8% d'humidité relative et un potentiel hydrique foliaire plus élevé. Le cultivar HKP a atteint des niveaux de déshydratation les plus forts ; ψ_f de -0,5 MPa plus bas.

2. La variété IC30 a montré une capacité à maintenir le rythme de l'assimilation malgré une diminution progressive de l'ouverture stomatique. En outre l'assimilation nette a été de 30% supérieure par rapport au HKP (DOLLON, 1992). Au stade avancé de la contrainte hydrique, la photosynthèse nette s'est stabilisée sur les plantes stressées, légèrement supérieure sur IC30 que sur HKP : 6 et 4 $\mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ (DOLLON 1992). Malgré des ψ_f très bas chez HKP, les échanges gazeux sont restés possibles. La fermeture stomatique n'a pas été totale.

3. Malgré des différences de potentiels élevées entre les feuilles et le sol ($\psi_f \ll \psi_s$), les flux d'eau chez les plantes stressées sont très faibles, d'où l'hypothèse d'une résistance au transfert élevée, notamment à l'interface sol-racine. La continuité hydraulique y devient de plus en plus difficile avec la diminution du diamètre des racines et celle de la pellicule d'eau capillaire autour des agrégats du sol. En outre, l'horizon de surface (0-50 cm), ne participe plus à

l'alimentation de la plante après une semaine d'arrêt de l'irrigation. Cet horizon est le plus colonisé par les racines, mais aussi le plus riche en éléments nutritif pour la plante.

4. La variété IC30 a amorcé la sénescence foliaire 3 jours avant HKP. Ceci se traduit par une différence d'environ ½ point entre les deux variétés jusqu'à la récolte. Le stress hydrique entraîne une précocité de la décroissance des feuilles vertes.

5. En 28 jours de stress hydrique IC30 a consommé plus d'eau qu'HKP. L'écart de consommation en eau, se produit à partir de la fin de la deuxième semaine de contrainte hydrique et se maintient jusqu'à la récolte. La consommation moyenne journalière du mil IC30 est alors supérieure d'un 1/2 mm à celle du mil HKP. Ceci se traduit par une différence d'environ 10 mm sur les consommations cumulées en fin de période de stress hydrique. L'indice de satisfaction en eau (ISE), rapport de la consommation moyenne du traitement stressé à celle du traitement irrigué, l'ISE est de 0,45 pour IC30 contre 0,27 pour HKP. La meilleure exploitation de la réserve hydrique a été observée chez la variété IC30 (60% des réserves contre 50% pour HKP et entre 100 et 200 cm, les réserves en eau sont encore disponibles, au moment où le mil subit une contrainte hydrique.

Cette étude nous a montré que la différence génotypique au niveau de la productivité face au stress hydrique terminal est liée à la résultante d'un grand nombre de petits effets qui s'additionnent dans le même sens, renforçant la thèse de la gouvernance polygénique de la tolérance à la sécheresse chez le mil.

Ainsi, deux mécanismes prédominants sont en relation avec la croissance des épis chez la **variété de mil IC30** : *l'arrêt précoce de l'extension des racines* au profit du remplissage des grains ; *l'amélioration de la conductance stomatique* par accélération de la sénescence foliaire avec maintien des échanges gazeux, car la sénescence foliaire attaque en priorité les feuilles basales les plus âgées dont l'assimilation carbonée est moins impliquée dans le remplissage des grains (Jacquinot, 1970).

Dans le cas de la **variété de mil HKP**, *la translocation vers les racines a été privilégiée et la vitesse d'extension des racines a favorisé un meilleur taux d'extraction de l'eau du sol pendant la première semaine de contrainte hydrique*. Ce processus a vite atteint ses limites suite au dessèchement rapide des horizons de surface les plus colonisés et la baisse

consécutives de la rhizogénèse. Le contenu relatif en eau et le potentiel hydrique ont alors rapidement chuté et la surface foliaire verte maintenue encore importante n'a pas permis une régulation stomatique adéquate. Ainsi la baisse des rendements chez la variété de mil HKP s'explique principalement par le détournement inefficace des assimilats vers les racines, aux dépens des épis; la chute du taux de remplissage des grains, et en fin de compte la diminution de la croissance globale par altération du statut hydrique des feuilles.

De l'analyse de ce travail, on peut tirer les éléments de leçon suivants :

- ✚ L'amélioration des réserves en eau et éléments minéraux des horizons de profondeur (> 50 cm) peut participer au renforcement de la stratégie de tolérance à la sécheresse de fin de cycle pour le mil ; tolérance en termes de sauver les rendements grains ;
- ✚ La performance du mil par rapport à la sécheresse est le résultat de la synergie d'un grand nombre d'effets favorables au maintien de l'assimilation chlorophyllienne et le transfert vers les épis, en dépit de la contrainte hydrique. L'amélioration de cette performance peut se faire par l'addition (ciblé ou aléatoire) de nouveaux gènes favorables.

La structure du poquet au moment de l'avènement du stress hydrique semble déterminante pour l'efficacité de la réponse de la plante. Ainsi, la recherche de l'uniformité du développement du poquet et de la culture entière devient une cible pour le sélectionneur et les agronomes.

1.3 AMELIORATION DE LA RESERVE EN EAU ET EN ELEMENTS MINERAUX DU SOL

Nos travaux se sont orientés vers l'amélioration de la nutrition hydrique et minérale de la culture de mil. Il nous a paru impératif de bien comprendre les mécanismes par lesquels les minéraux et l'eau interagissent lorsqu'ils sont tous les deux insuffisants.

L'expérimentation est entreprise sur un sol ferrugineux tropical typique pour la culture traditionnelle du mil au Niger (texture sableuse, faible teneur en matière organique, faible fertilité chimique et pH acide à très acide). Il s'agit d'évaluer l'efficacité réelle de la dose de 46 kg N ha⁻¹ recommandée par la vulgarisation agricole au Niger pour la culture du mil, en faisant appel au marquage isotopique au ¹⁵N. L'expérience a été réalisée en plein champ, pendant l'hivernage, en imitant autant que possible les pratiques culturales extensives des paysans. L'engrais marqué a été apporté sur des micro-parcelles délimitées au milieu de

chaque unité expérimentale. Les poquets des micro-parcelles marquées ont été utilisés pour la mesure de l'excès isotopique et le calcul des coefficients d'utilisation de l'engrais.

Les coefficients réels d'utilisation de l'engrais azoté ont variés de 19,9% à 28,8%. Ce travail a montré que 70 à 80% de l'azote de l'engrais apporté au sol n'a pas été utilisé par la culture, la première année d'application.

La proportion de l'azote de la plante provenant de l'engrais (N_{dff}) varie de 49 à 54,1%, indiquant qu'environ 50% de l'azote de la plante provient du sol. Malgré la faible teneur en matière organique des sols sableux du Niger, ils restent la principale source d'azote pour la culture du mil. Ceci souligne l'importance de la matière organique du sol (y compris les résidus de culture) pour la fertilité des sols et la nutrition azotée des plantes.

La même évaluation a été faite pour la fertilisation phosphatée avec l'objectif de savoir si le phosphate naturel de Tahoua peut substituer l'engrais phosphaté soluble importé à grand frais par le Niger. La faible teneur en phosphore biodisponible est souvent la première cause de la faible productivité des sols tropicaux. Le phosphate naturel de Tahoua (TRP) a une teneur en P_2O_5 de 26%, mais est très peu soluble dans l'eau (0,1%). Son utilisation directe en agriculture est sujette à caution. Le SSP a une teneur en P_2O_5 de 20%. Le marquage isotopique au ^{32}P a été fait sur des micro-parcelles de 2,25 m² délimitées au milieu de chaque unité expérimentale. L'engrais marqué a une radioactivité spécifique de 6,5 mCi par gramme de P. Les résultats ont montré que seuls 15% du SSP apporté au sol ont été réellement utilisés par la plante. Plus de 84% ont un devenir qu'il est urgent de déterminer car pouvant être à l'origine de pollution des sols et des eaux. Le phosphate naturel de Tahoua a contribué à la nutrition phosphatée de la culture du mil et du niébé. Appliqué sous la forme brute, il possède une certaine efficacité agronomique observable la première année de son application. L'apport du phosphate naturel a entraîné la réduction du niveau de l'utilisation du P de l'engrais soluble SSP de 44%, et ceci sans modifier significativement les rendements en matière sèche.

L'utilisation de la technique de marquage isotopique (^{15}N et ^{32}P) nous a permis de montrer que dans le système de culture-niébé sur sols sableux dunaires, moins de 30% des apports d'engrais chimiques sont effectivement utilisés par la culture. Cela dénote un risque réel de pollution à prévenir en cas de grosses pluies ou d'irrigation pouvant générer le drainage en profondeur. Les sols sableux dunaires, malgré leurs maigres réserves, restent la source privilégiée pour l'alimentation en éléments minéraux du mil. La gestion de la fertilité doit

s'orienter vers des techniques innovantes pour renforcer la capacité de stockage du réservoir sol (augmentation du taux de matière organique, affinement de la texture, fertilité symbiotique etc.).

1.4 TRAITEMENT DES ETATS DE SURFACE ET AMELIORATION DE L'INFILTRATION DES EAUX DE PLUIE EN SOL DE GLACIS

L'essai a eu lieu dans le terroir de Bogodjotou à 50 km au Sud de Niamey au Niger, sur un terrain dominé par des plateaux cuirassés impropres à la culture. Les terres cultivables sont concentrées dans les basfonds et sur glacis et soumis à une forte pression entraînant une dégradation rapide. Le sol est du type ferrugineux tropical de texture sableuse à sablo-limoneuse. Les parcelles élémentaires de 10 m x 5 m ont été implantées sur une jachère de 5 ans d'âge. Cinq traitements sont appliqués à la surface du sol : le scarifiage (S), le Branchage (B), le Scarifiage associé au branchage (SB), le paillage (P) et le Zai (Z). Ces techniques sont comparées à la jachère ordinaire non perturbée considérée à ce titre comme le Témoin (T). *Le scarifiage* consiste à un léger labour manuel effectué à la daba par les jeunes agriculteurs du terroir. *Le branchage* consiste à l'apport en surface de l'équivalent de 30 tha^{-1} sous forme de résidus animaux et végétaux disponibles dans le terroir. Il s'agit en l'occurrence de branches mortes de *Guera senegalensis* et de résidus de l'abattoir. *Le paillage* correspond à l'apport de l'équivalent de 17,6 tha^{-1} de paille de mil. *Le zai* consiste en des trous de 40 cm de diamètre et 20 cm de profondeur recevant du fumier et dont la terre extraite est disposée en bourrelet en aval. Les trous sont espacés de 80 cm et disposés en quinconce. La quantité de fumier est l'équivalent de 2,8 tha^{-1} . De toutes les techniques testées, le scarifiage couplé au branchage avec des résidus organiques locaux ont montré la meilleure efficacité, permettant l'infiltration de l'eau jusqu'à 200 cm de profondeur, contre seulement 50 cm pour le sol non traité. Ce travail a montré que l'évolution des états de surface, associée à une pente même légère (0,5%), peut aboutir à un faible niveau de l'infiltration et amenuiser la réserve en eau du sol utilisable pour la croissance végétale et le retour de la fertilité.

1.5. GESTION INTEGREE DE L'EAU ET DES ELEMENTS MINERAUX

Pour les besoins de la rentabilité, l'agriculture traditionnelle évolue vers des systèmes de cultures nécessitant des apports d'eau et d'intrants agricoles de plus en plus croissants. L'arrosage manuel est progressivement remplacé par l'arrosage motorisé et l'agriculture fait

appel à des quantités croissantes d'engrais chimiques. Ceci requière une surveillance attentive pour prévenir toute dégradation irréversible des sols et de l'environnement.

Notre travail, basé sur une double approche (enquête et expérimentation) a analysé l'état des pratiques de la fertilisation et de l'irrigation dans la BVT, située à environ 600 Km à l'Est de Niamey. C'est une formation exceptionnelle, un bassin fossilisé aux sols fertiles et au sous-sol gorgé d'eau, à faible profondeur, renouvelées chaque année par le ruissellement naturel des eaux de pluies. Deux types d'irrigations se distinguent principalement par leur mode d'exhaure : l'irrigation traditionnelle manuelle qui se fait à l'aide d'une puisette enalebasse de volume variable ; et l'irrigation motorisée qui s'est développée progressivement sur le périmètre grâce à l'appui du Projet Basse Vallée de la Tarka. La détermination des doses d'apport des engrais sont faites manuellement grâce à la pesée de l'engrais (balance portative) et la mesure de la surface emblavée (quintuple décamètre ruban). L'engrais est souvent apporté par fraction et la quantité totale apportée est obtenue en sommant les apports fractionnés sur l'ensemble du cycle cultural.

L'analyse des pratiques de l'irrigation dans la basse vallée de la Tarka montre une relative maîtrise des outils traditionnels d'arrosage. En effet, l'irrigation optimale, c'est-à-dire celle qui maintient la capacité au champ dans la zone radiculaire en limitant au maximum les pertes par percolation en profondeur a été observée chez les irrigants manuels. L'introduction de la motopompe a permis de gagner en temps et en nombre d'irrigations. La capacité de travail de l'exploitation se trouve accrue et la mise en culture de plus grandes superficies devient possible. Cependant, le contrôle de l'irrigation est basé sur l'expérience des producteurs, sans critères techniques précis. Ceci occasionne malheureusement des pertes considérables d'eau (et d'éléments minéraux), mis en évidence par nos travaux. Ce travail a aussi fait apparaître un réel besoin de rationalisation de la fertilisation chimique chez les producteurs qui pratiquent des doses massives pouvant atteindre 460 kg N ha^{-1} . Ce travail a eu le mérite d'attirer l'attention sur le besoin de recherche d'accompagnement et d'encadrement des petits exploitants agricoles en relation avec le risque de pollution des nappes phréatiques mis en évidence plus haut.

1.6 QUANTIFICATION DES FLUX D'EAU ET DE MINERAUX EN PROFONDEUR ET PREVENTION DE L'ENVIRONNEMENT

La conversion de l'utilisation des terres de cultures pluviales à la culture irriguée augmente le drainage et la recharge des nappes, mais des estimations fiables de l'ampleur du changement

sont difficiles à obtenir pour les aquifères peu profonds. Dans la vallée de la Komadougou Yobe (bassin du lac Tchad, Sud Est du Niger), la zone de culture irriguée a doublé au cours des trois dernières décennies, ce qui peut avoir une augmentation des flux de la nappe phréatique. La connaissance de ces flux permettra également de quantifier les substances en solution et éventuellement prévenir les risques de pollution de ces nappes en particulier par les nitrates agricoles.

Nos travaux ont permis, grâce à un dense réseau d'échantillonnage de sol, de déterminer les différents faciès de sol et leur stratification. Les données relatives aux caractéristiques hydriques et hydrodynamiques recueillies, ainsi que les sondages humidimétriques à la sonde à neutrons, ont permis d'asseoir un modèle tridimensionnel de détermination des flux d'eau en profondeur, en tenant compte de l'hétérogénéité pédologique. La recharge des eaux souterraines a été simulée séparément dans des conditions irriguées et pluviales. Il a été mis en évidence le rôle déterminant des états de surface dans la simulation des processus d'évapotranspiration dans les zones semi-arides. L'augmentation de la recharge en eaux souterraines pour la vallée de la Komadougou Yobe correspond à 18 à 23% des précipitations ou de l'irrigation et est compatible avec les études précédentes à l'échelle mondiale. La méthode mise au point pour estimer les changements dans les flux peut être utilisée dans d'autres régions semi-arides. Il est particulièrement adapté pour les aquifères peu profonds avec des flux relativement rapides dans la zone vadose qui empêchent l'utilisation de traceurs conservateurs (par exemple chlorure) aux estimations des changements dans les flux d'eau en réponse à des changements dans l'utilisation des terres.

En résumé, d'un côté, en sol sableux dunaire et sur terre de glaciais, les eaux de pluie et les éléments minéraux apportés au sol restent en surface. Leur utilisation par la plante est compromise en cas de stress hydrique. D'un autre côté, sur les terres de basfond les plus fertiles, les pratiques d'irrigation et de fertilisation trop excédentaires, peuvent être à l'origine de dégâts sur l'environnement. Dans les deux cas, nos travaux ont eu le mérite de mettre en évidence l'existence du danger et d'attirer l'attention des agronomes et des décideurs.

1.7 AMELIORATION DE LA TOLERANCE A LA SECHERESSE CHEZ LE MIL

La méthodologie générale de notre travail d'amélioration de la culture du mil s'est articulée autour de cinq axes majeurs :

- ✓ La collecte de matériel végétal disponible au niveau local (écotypes locaux employés par les paysans) et la constitution de collections de base caractérisées par un spectre génétique large ; *Un mois d'enquête et de collecte d'échantillons à travers les cinq principales zones de production du mil au Niger. Un total de Cent-vingt-sept (127) écotypes locaux ont été collectés. Le matériel ainsi accumulé est multiplié, et conservé dans des sachets plastiques hermétiques à une humidité relative en dessous de 13% et une température de -20 °C. Il est soumis à une épuration progressive.*
- ✓ L'évaluation de ces collections pour de nombreux traits morphologiques, agronomiques, biochimiques et moléculaires ;
- ✓ L'Irradiation et la présélection suivant des techniques de la mutagenèse induite ;
- ✓ La mise au point de méthodologies et de test de screening et d'identification de mutants intéressant (tests *in vitro* de tolérance aux stress hydriques et thermiques)
- ✓ L'évaluation en plein champs des nouveaux mutants identifiés (tests de réponses environnementales et en milieu paysan).
- ✓ Caractérisation moléculaire des nouveaux mutants

1.7.1 Caractérisation de la radio-sensibilité du mil (et du niébé)

Ce travail est une étape nécessaire pour la sélection par mutagenèse induite. L'introduction de variabilité par irradiation a été démontrée, pour la première fois, sur des graines d'orge en 1928 par Stadler. Depuis, sur plus de 2 250 nouvelles variétés produites, environ 1500 sont dérivées de la mutagenèse induite.

Une mutation est un processus par lequel l'information génétique d'un organisme est modifiée de façon stable et héréditaire. Ces modifications génétiques servent de base à l'amélioration des plantes. Ces mutations modifient les séquences des nucléotides de l'ADN avec des effets divers sur les gènes : inactivation, dérégulation ou modification des fonctionnements des protéines. Les gènes codent les protéines ce qui entraîne une modification des caractères physiques visibles (le phénotype). La mutagenèse se compose de deux grandes parties : l'application du traitement mutagène et la sélection des mutants.

Pour que le traitement soit efficace, il faut que de nombreuses mutations soient produites. Les mutations apparaissent alors au hasard dans le génome, beaucoup d'entre elles vont toucher

les gènes essentiels, et donc après le traitement, le taux de survie va être fortement diminué. En pratique, il faut donc partir d'un effectif suffisamment grand pour tenir compte de la létalité. Le taux de survie est une indication de l'efficacité du traitement mutagène. Classiquement, un taux de survie de 1 à 5% est indicatif que le traitement à bien fonctionné et que de nombreuses mutations ont été produits. On obtient ainsi des mutations qui ont un large éventail d'effets (exemples : mort d'une plantes, augmentation du nombre de pétales, couleurs modifiées, diminution de la hauteur de plante, augmentation de la tolérance à la sécheresse, des rendements plus élevés etc...). Le but est d'obtenir des mutants qui ont un phénotype voulu ou souhaité. Elle est cependant aléatoire avec le risque de provoquer la formation de chimère.

Le but du rayonnement gamma dans la mutagenèse est d'atteindre la molécule d'ADN et de produire des mutations. Ceci va faire intervenir des enzymes de réparation. Ces enzymes peuvent faire des erreurs au cours de la réparation. Si une de ces erreurs survient dans une partie codante de l'ADN cela peut peut-être provoquer une répercussion sur l'expression du gène.

Ainsi, la détermination de la dose efficace, celle qui affecterait l'ADN de l'explant traité, est une première étape préalable au développement de la méthode par mutagenèse induite. Dans notre cas, le test de sensibilité aux rayons gamma a été fait sur les graines sèches de mil (variété HKP) et de niébé (variétés TN-578 et IT90K372-1-2). L'irradiation a eu lieu au Centre de technologie pour l'irradiation (Radiation Technology Center) de la Commission de l'énergie atomique du Ghana (GAEC), à Accra en novembre 2012, en utilisant une source Cobalt-60. Sept niveaux d'irradiation ont été testés : 0 (Control), 100, 200, 300, 400, 500, 600 et 700 Gy. L'irradiation été effectuée avec intensité moyenne de 258,8 Gy par heure. Après l'irradiation, les graines ont été semées, une moitié in vitro dans des boîtes de Pétri, et une moitié dans des pots en PVC sous une ombrière.

La LD₅₀ (*Lethal Dose for 50% growth inhibition*) est la dose d'irradiation qui entraîne une réduction de la croissance de moitié par rapport au témoin non irradié. Elle est considérée comme la dose efficace pour la production de la mutation. Nos résultats ont montré que cette dose est de 669 Gy pour le mil et de 176 et 209 Gy pour les deux variétés de niébé. Ces doses sont alors utilisées comme doses d'irradiation pour les travaux ultérieurs.

1.7.2 Screening des mutants tolérants à la sécheresse

La présente étude a été menée pour déterminer une méthode de dépistage *in vitro* pour la tolérance à la sécheresse, basée sur l'utilisation de polyéthylène glycol (PEG) de poids moléculaire 6000. Le PEG6000 de poids moléculaire élevé est inerte, non ionique. Il est assez petit pour influencer le potentiel osmotique, mais assez grand pour ne pas être absorbé par la plante. Il pourrait abaisser le potentiel osmotique de la solution nutritive sans être pris en charge ni être phytotoxique (Lawlor, 1970). Le PEG de haut poids moléculaire a longtemps été utilisé pour simuler le stress hydrique dans la croissance des plantes comme décrit par les travaux précédents (Kaufmann et Eckard, 1978; Tazi *et al.*, 2003; Zgallai *et al.*, 2007; Kouakou *et al.*., 2008; Fan *et al.*, 2012). L'effet du PEG6000 sur la germination et la croissance des jeunes plants de mil ont été analysés. Les données ont été utilisées pour déterminer la LD₅₀ qui est dose qui entraîne une inhibition de la croissance de 50%. L'expérience a été réalisée entre avril et mai 2011, dans le laboratoire de biotechnologie végétale de l'Université Libre de Bruxelles (ULB). Le stress hydrique a été appliqué en utilisant sept concentrations de PEG6000, correspondant à -1,0; -3,7; -8,0; -9,8; -11,3; -13,0 et -14,7 bars du potentiel hydrique. Ce potentiel d'eau a été obtenu en ajoutant dans 1000 ml d'eau pure déionisée, respectivement: 100; 200; 300; 325; 350; 375 et 400 g de PEG6000, selon la méthode de Lawlor (1970) et Michel (1983). La LD₅₀ était de 262 gL⁻¹ pour le pourcentage de germination et 242 gL⁻¹ pour l'émergence des coléoptiles. Ces valeurs indiquaient les concentrations de PEG6000 qui entraîneraient une réduction de 50% de la germination et de l'émergence de coléoptiles. Le principe du dépistage est d'identifier les lignées ou les variétés avec des pourcentages de germination et d'émergence supérieurs à 50% avec la LD₅₀. Dans cette étude, les résultats nous permettront de détecter les mutants de mil tolérants à la sécheresse issus de nos travaux de la mutagenèse induite.

Ces travaux ont permis de parachever la mise au point méthodologique pour la mise en œuvre de l'amélioration par mutagenèse induite des principales cultures du Niger. La LD₅₀ a permis de déterminer la dose efficace d'irradiation gamma (pour induire la mutation) sur les semences sèches de mil et niébé. La méthode de screening permet d'identifier les mutants tolérant la sécheresse. Ces deux méthodes peuvent être adaptées à d'autres cultures et à d'autres caractères que la sécheresse.

CONCLUSION

Les travaux présentés à travers cette synthèse montrent une contribution significative pour la description des principaux mécanismes de tolérance à la sécheresse chez le mil, sur la base morphologique et agro-physiologique. Ils montrent que la différence génotypique au niveau de la productivité face au stress hydrique terminal est liée à la résultante d'un grand nombre de petits effets qui s'additionnent dans le même sens. Ceci soutient la thèse de la gouvernance polygénique de la tolérance à la sécheresse chez le mil. L'arrêt précoce de l'extension des racines au profit du remplissage des grains et l'amélioration de la conductance stomatique par accélération de la sénescence foliaire expliquent chez IC30 le maintien du meilleur remplissage des épis malgré la contrainte hydrique. La variété de mil HKP a privilégié l'extension des racines en profondeur à la recherche de l'eau du sol. Ce processus s'est avéré négatif pour le remplissage des épis.

Ces travaux mettent en évidence quelques pistes pour soutenir l'expression de la tolérance à la sécheresse chez le mil dans le contexte du Niger. Il s'agit notamment de maximiser l'infiltration des précipitations dans la zone racinaire et de minimiser les pertes d'eau et d'éléments minéraux par drainage profond.

PARTIE II : ANALYSE DES TRAVAUX

**CHAPITRE 1 : MECANISMES AGROPHYSIOLOGIQUES DE TOLERANCE A LA
SECHERESSE CHEZ LE MIL**

1.1 Introduction

Le problème de sécheresse hydrique est à l'origine de nombreuses calamités (famines) pour un grand nombre de populations dans les régions arides du monde comme la région sahélienne. Les pertes des rendements liées aux impacts des stress peuvent y atteindre 82% de la production totale (Bray *et al.*, 2000). La sécheresse explique plus de la moitié des pertes de rendements agricoles observés dans le monde. Elle rend aléatoire et hautement risqué le recours aux engrais chimiques qui ont soutenu la « révolution verte en Asie et en Amérique Latine » .

Le déficit hydrique apparaît dans une plante quand ses pertes en eau (transpiration) excèdent ses possibilités d'absorption racinaire. Cette contrainte hydrique se répercute rapidement sur les activités métaboliques de la plante et, à plus long terme, sur sa morphologie. Le déficit hydrique peut intervenir de manière transitoire, pendant les heures chaudes de la journée ou bien être plus durable s'il résulte de conditions climatiques défavorables. Dans la zone tropicale semi-aride, deux périodes de fortes probabilités de sécheresse menacent plus particulièrement les cultures annuelles: la première au moment de l'installation de la culture, la seconde à partir de la floraison (Sivakumar, 1986). La seconde situation (appelée indifféremment sécheresse terminale, ou de fin de cycle, ou post-florale) est assurément la plus dangereuse. Elle survient en effet alors que les resemis ne sont plus possibles et affecte la fécondation, ce qui peut remettre en cause le rendement en grain escompté. Face au déficit hydrique la plante réagit par des mécanismes morpho-physiologiques d'évitement ou de tolérance à la sécheresse (Levitt 1980 ; Blum, 1996 ; Blum *et al.*, 1996). L'un des plus importants de ces mécanismes est l'extension du système racinaire (Passioura 1996 et 2006 ; Clarke *et al.* 1984 ; Jones and Zur, 1984 ; Muchow and Sinclair, 1986). Il est généralement admis que l'utilisation de la réserve en eau du sol est étroitement liée à la morphologie (profondeur et densité) et à l'activité (Conductivité hydraulique notamment) du système racinaire (Gregory *et al.* 1984, Ludlow *et al.* 1988, Gregory 1989). Il est évident que le système racinaire le plus profond met à la disposition du végétal le plus grand volume de sol à exploiter. Jordan *et al.* (1983) ont montré chez le sorgho, qu'un enracinement profond peut augmenter jusqu'à 20% le rendement au cours des années sèches. On a donc pensé que l'identification de cultivars à enracinement profond suffisait pour aboutir à l'amélioration et la sécurisation de la production agricole en zones arides. Un effet génotypique sur la profondeur et la forme de l'enracinement a en effet été démontré chez différentes espèces cultivées (Shrinivas and Subbiah (1976), Batcho *et al.* (1990) sur le mil; Hurd (1974) sur le blé; Taylor

et al. (1978) sur le niébé; Mathews *et al.* (1988) sur l'arachide; Jordan *et al.* (1979) sur le sorgho). Mais la question s'est posée sur les relations entre un enracinement profond et le développement des parties aériennes d'une part (concurrence ou synergie entre les différents organes?) et d'autre part la dynamique d'utilisation de l'eau du sol chez le mil. Turner et Nicholas (1987) obtiennent une plus grande biomasse à la floraison et un rendement en grain supérieur chez le géotype qui a montré la plus grande vitesse de croissance racinaire en phase d'installation. Mais dans le cas d'un stress hydrique terminal, qui intervient à la floraison, au moment même où on semble admettre que la croissance du système racinaire prend fin, quel sera le type d'enracinement à la floraison le plus favorable, pour une meilleure utilisation de l'eau du sol et le maintien du rendement ? Un enracinement étendu et dense, à grande capacité et rapidité d'exploitation des réserves du sol, ou bien un système racinaire plus ou moins suspendu, laissant généralement de l'eau disponible résiduelle à maturité ? Quel est le rôle de cette structure du système racinaire à la floraison pour le comportement ultérieur du mil concernant l'exploitation de la réserve en eau du sol, le maintien de la morphologie et des capacités photosynthétiques, le remplissage des grains, pendant une sécheresse terminale ? Qu'il s'agisse d'un système racinaire étendu et dense ou d'un système racinaire suspendu, quelle serait la réaction face à un déficit hydrique terminal ? Une extension (néogenèse) en profondeur ou latérale ? Comment alors différencier ce phénomène morphologique du système racinaire, d'une simple entrée en activité de racines déjà présentes dans le sol ? Cette distinction est importante car l'incidence des deux processus sur l'utilisation des ressources carbonées de la plante et donc sur le rendement est différente. La réponse à ces questions permettra de préciser, pour les conditions de cultures étudiées (sol, régime hydrique), les stratégies d'utilisation de l'eau du sol développées par les différents cultivars de mil ainsi que les réactions morpho-physiologiques qui leur sont associées. Pour ce faire il faut:

- ✚ caractériser la structure initiale de la plante à la floraison à travers la répartition de la biomasse entre les différents organes (racines, tiges, feuilles, épis);
- ✚ déterminer les liens existant entre cette structure à la floraison et la croissance racinaire en phase d'installation de la culture; son rôle dans l'exploitation post-florale de la réserve en eau du sol, et le maintien du rendement, en période de déficit hydrique;
- ✚ déterminer l'évolution morphologique du système racinaire au cours d'une période de stress hydrique post-floral;

- ✚ parallèlement, caractériser l'activité du système racinaire et sa dynamique par le suivi de l'extraction de l'eau du sol et l'étude de sa répartition dans le profil durant la période de déficit hydrique;
- ✚ relier ce fonctionnement racinaire à la croissance et à l'état hydrique de la partie aérienne pour en préciser les conséquences sur l'élaboration du rendement.

La méthodologie adoptée repose sur une approche comparative du fonctionnement racinaire de cultivars réputés plus ou moins résistants à la sécheresse, soumis à des régimes hydriques naturels (pluviaux) ou contrôlés (contre saison, rhizotron), avec des témoins irrigués.

1.2. Mécanismes agrophysiologiques de résistances à la sécheresse chez le mil

L'idée première était d'aider à stabiliser la production agricole contre les aléats climatiques, en améliorant l'adaptation des principales cultures aux stress abiotiques dont particulièrement la sécheresse. L'étude met en relief le comportement de deux groupes de cultivars de mil (*Pennisetum glaucum*) face à une contrainte hydrique appliquée à un stade précis de développement : un groupe tolérant et un groupe sensible à la sécheresse. La mesure diachronique de paramètres physiologiques (potentiel foliaire, conductance stomatique, résistance protoplasmique, humidité relative foliaire, humidité du sol, potentiel hydrique du sol), phénologiques (biométrie foliaire, surface foliaire verte et sénescence, biomasse racinaire) et agronomiques (biomasse totale, rendement), a permis de contribuer à mieux connaître les mécanismes de tolérance à la sécheresse chez le mil et d'asseoir une base pour une amélioration génétique de l'espèce. Travaillant sur un stress hydrique terminal de moyenne intensité (ETR/ETM=50%), mais de longue durée (30 Jours), nous avons mis en évidence deux types de comportements physiologiques corrélés à la dispersion variétale des rendements : un type "tolérant" à la déshydratation, avec une baisse relative de rendement de 20% et un type "sensible" caractérisé par des réactions physiologiques marquées (sénescence foliaire précoce, régulation stomatique précoce, augmentation du module d'élasticité membranaire, rhizogenèse abondante..), avec une baisse relative de rendement de 65%. Il est en outre apparu une relativité des conséquences agronomiques d'un type de comportement physiologique en fonction des conditions de stress (intensité et durée en particulier). Ce travail a fait l'objet d'une publication **DO F., DAOUA OUSMANE S., MARINI P. (1989).** *"Étude agrophysiologique des mécanismes de résistance du mil à la sécheresse: cas d'un stress hydrique terminal"*. Revue du Réseau pour l'Amélioration de la Productivité Agricole en Milieu Aride, 1989, Vol. 1. pp 57-74.

N
DON, CS4

ETUDE AGROPHYSIOLOGIQUE DES
MECANISMES DE RESISTANCE DU MIL A LA
SECHERESSE
(Cas d'un stress hydrique terminal)

Frédéric Do*, Ousmane S. Daouda** et P. Marini**

* Volontaire du service national ORSTOM

** Institut des Radio-Isotopes de l'Université de Niamey,
BP 10727 Niamey - Niger

Résumé : Les mécanismes de résistance du mil (*Pennisetum glaucum*) à un stress hydrique terminal sont étudiés comparativement sur trois cultivars et sur un mil sauvage (subspécies *violaceum*) en contre-saison froide à Niamey. Face à un stress d'intensité moyenne (ETRIETM = 50%) mais de longue durée, sont apparus deux types de comportement physiologique corrélés à la dispersion variétale des rendements :

- Un type "tolérant à la déshydratation" qui s'est avéré le plus performant avec une baisse relative de rendement de 20%.

- Un type "sensible à la déshydratation" caractérisé par des réactions physiologiques plus marquées (sénescence foliaire, régulation stomatique plus précoce, augmentation du module d'élasticité membranaire, ...) qui, par une réduction plus rapide de ses capacités photosynthétiques, s'est avéré le moins performant avec une baisse relative de rendement de 65%.

On a pu, d'autre part, mettre en évidence la relativité des conséquences agronomiques d'un type de comportement physiologique en fonction des conditions du stress (intensité, durée, ...).

Mots clés : Mil, résistance, stress hydrique terminal, mécanismes physiologiques, Niger.



Fonds Documentaire IRD
Cote : B* 23105 Ex: 1

Exemplaire unique

INTRODUCTION

L'autosuffisance alimentaire, pôle prioritaire de recherche au Sahel, suppose une meilleure stabilité de la production du mil face aux aléas climatiques.

Accompagnée de techniques culturales appropriées et acceptables par le paysan sahélien, l'amélioration de la résistance à la sécheresse des variétés constitue un enjeu fondamental qui, paradoxalement, a suscité un investissement scientifique limité jusqu'à des temps très récents.

De façon complémentaire, à l'approche statistique menée par l'ICRISAT depuis 1988 dans des tests de résistance sur plus de quarante génotypes (Comm. pers.), est apparu l'intérêt d'une approche analytique, agro-physiologique sur des variétés au comportement révélé contrasté afin de mieux cerner les mécanismes fondamentaux qui régissent la résistance des mils à la sécheresse.

C'est en se fondant sur cette approche agro-physiologique que le programme de recherche qui débute à l'Institut de Radio-Isotopes a été établi en collaboration avec les laboratoires de physiologie végétale des professeurs Louguet (Université Paris XII) et Vieira da Silva (Université Paris VII).

Dans l'article qui suit, nous présentons les principaux résultats obtenus lors de la première année d'expérimentation.

MATÉRIEL ET MÉTHODES

1. Matériel

1.1. La période climatique

Suite aux conclusions de l'ICRISAT (Sivakumar, 1986) sur les risques maximum de stress hydrique en zone sahélienne (début et fin de cycle), nous avons choisi de travailler dans un premier temps sur un stress terminal.

Afin de contrôler le stress hydrique, l'essai a été mené en contre-saison. Le semis a été réalisé le 27 octobre. Le cycle cultural s'est donc déroulé de novembre à février, soit en contre-saison froide.

Les conditions climatiques moyennes lors du stress sont indiquées dans le tableau récapitulatif de l'essai.

Mécanismes de résistance du mil à la sécheresse

Bilan de l'essai de contre-saison froide 1988-89.

Stress hydrique terminal

Conditions climatiques moyennes lors du stress : Températures jour/nuit : 31°/15°C ; Humidité relative à 12h. : 13,6% ; ETPj : 4,9 mm ; Intensité : ETR/ETP # 50% ; Durée : 40 j (cycle de 110 j).

Variétés	IC27	HKP	SV	IC30
Rendements (kg/ha)				
- rendement potentiel	765	653	205	997
- chute relative (%)	- 18	- 20	- 59	- 69
Sensibilité au stress				
- Variabilité sous stress (cv inter-parcelle, %)	± 43	± 39	± 27	± 9
Paramètres du rendement				
baisse relative du :				
- nbre de grains/m ² (%)	- 14	- 9	- 47	- 66
- nbre d'épis/m ² (%)	- 9	- 16	- 45	- 66
Evitement phénologique				
- vitesse de floraison des brins-mâtres	o	o		--
Limitation de la déshydratation				
- néogenèse racinaire	+	+	+	+
- sénescence foliaire	+	+	++	+++
- précocité de la régulation stomatique	o	o	+	+
Réaction physiologique à la déshydratation				
- pot. hydr. foliaire	+	+	++	+++
pot. osmotique				
- à turgescence max	o	o	+	+
- à turgescence nulle	o	o	o	+
- module d'élasticité membranaire	+	+	++	+++

Notations de l'amplitude relative (inter-variétale) des mécanismes observés :
o nulle ; + faible ; ++ moyenne ; +++ importante.

1.2. Le matériel végétal

On a recherché des variétés de mil (*Pennisetum glaucum*) à cycle de 90 jours, au comportement contrasté face à un stress hydrique terminal. Les contraintes expérimentales ont limitées leur nombre à quatre :

- HKP, variété de référence (sélection IRAT) vulgarisée par l'INRAN dans la zone de Niamey et considérée comme résistante.

- ICMVIS 85327 (IC27) et ICMVIS 86330 (IC30), cultivars améliorés par l'ICRISAT qui, sur les 45 géotypes testés à Sadoré en contre-saison chaude 1988, ont été affectés des index de résistance à un stress terminal les plus extrêmes (Fussel, comm. pers.), les désignant comme sensible (IC27) et résistant (IC30).

Il faut noter que la variété HKP était également représentée dans le test et qu'elle s'est avérée sensible, en contradiction avec l'évaluation de l'INRAN.

- Un mil sauvage (subspécies *violaceum*) (SV) fourni par les généticiens de l'ORSTOM (Marchais et Tostain) et qui devrait présenter un comportement hydrique particulier.

Ces quatre variétés sont étudiées également en phytotron dans le laboratoire de physiologie végétale de l'Université Paris XII (Louguet et Laffray) et dans le laboratoire associé CEA-ORSTOM de Cadarache (Bois).

2. Méthodes

2.1. Le contrôle hydrique du sol

L'irrigation est conduite par goutteurs débitant 4 l/h, à raison de deux goutteurs par mètre. En tenant compte de l'efficacité supérieure de l'irrigation localisée, la dose d'eau apportée quotidiennement correspond à 0,7 ETM.

Sur une moitié de l'essai, les témoins sont irrigués jusqu'à maturité et sur l'autre moitié, un stress hydrique terminal est imposé par arrêt de l'irrigation à la floraison (sortie des stigmates sur 50% des épis principaux ; 60 ± 2 jours après émergence).

Le dessèchement du sol est suivi par des mesures neutroniques.

2.2. Techniques culturales

Les quatre variétés ont été semées en poquet de 15 à 20 graines à une densité de un poquet par mètre carré le 27 octobre 1988. Le démariage à trois brins (soit 30 000 plants/ha) a eu lieu le 14 novembre et la récolte le 16 février.

Un apport modéré (60 unités) d'engrais azoté en solution a été effectué à la montaison.

Ces conditions moyennes de fumure et de densité correspondent à la culture semi-intensive actuellement préconisée par l'INRAN.

2.3. Le dispositif expérimental

Le dispositif expérimental est installé sur un sol typique de la zone de culture du mil, sol sableux, dunaire, profond, de type ferrugineux tropical, peu lessivé.

Mécanismes de résistance du mil à la sécheresse

Le dispositif statistique représente un essai factoriel pyramidal à deux niveaux : hydrique (deux modalités) et variétal (quatre modalités) avec quatre blocs de huit parcelles. Une parcelle élémentaire (60m²) comprend quatre lignes de 15 poquets avec au centre 26 poquets de mesure.

Chaque bloc est associé à un type de mesures au cours du cycle ; seules les mesures finales (paramètres du rendement) sont réalisées sur l'ensemble des blocs.

2.4. Les mesures agronomiques

Les mesures agronomiques décrites ont un rythme hebdomadaire et sont effectuées sur chaque couple variété-traitement (8).

2.4.1. Au cours du cycle

- Mesures non destructives

Les stades phénologiques du brin-maître principal (neuf stades de référence de Vanderlip) et le développement du poquet (nombre de tiges, hauteur, sénescence foliaire, ...) sont suivis, sur un échantillon de six poquets, du démariage à la récolte.

A ces mesures hebdomadaires sur un nombre limité de poquets s'ajoutent ponctuellement dans le temps, des comptages exhaustifs effectués sur l'ensemble des parcelles élémentaires (initiation florale, floraison femelle, nombre de tiges épiées).

- Mesures destructives

Suite au prélèvement de quatre poquets, nous mesurons :

- la surface foliaire verte totale au planimètre Licor,
- la production de matière sèche (MS) totale et sa répartition entre les différents organes (Tiges + gaines, limbes verts et sénescents, épis).

L'évolution du remplissage des grains est étudiée par le suivi du poids de 1 000 grains enveloppés de la floraison à la maturité.

2.4.2. A maturité

Sont déterminés les paramètres du rendement :

- poids d'épis/m² et poids de grains/m²
- poids de 1 000 grains
- matière sèche totale/m².

De plus, afin de caractériser les systèmes racinaires à maturité, des carottages sont effectués sous la ligne d'irrigation et dans l'interligne.

2.5. Les mesures physiologiques

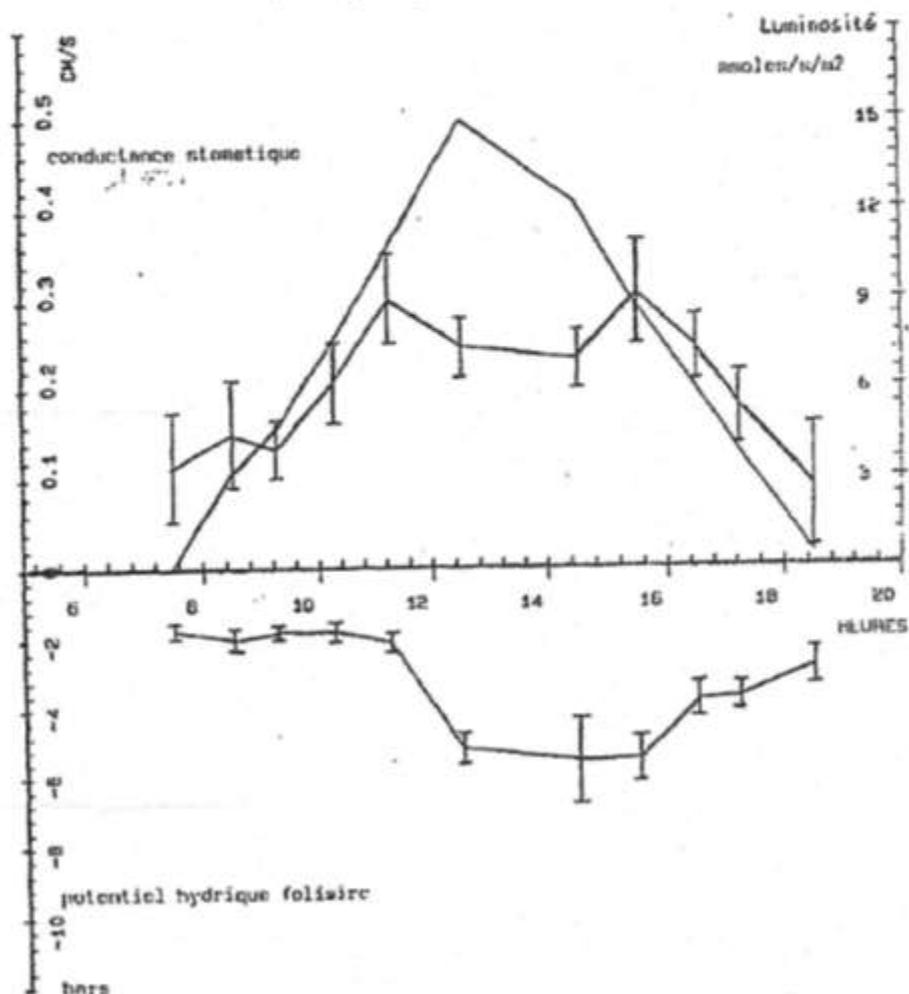
Les mesures physiologiques ont débuté deux semaines avant le début de la contrainte hydrique, soit la 8^{ème} semaine du cycle, suivant le même protocole hebdomadaire sur les traitements I (irrigué) et S (stressé) jusqu'à la maturité.

2.5.1. Sur le terrain

Ce protocole comprend :

- Une étude cinétique, au cours de laquelle nous mesurons, heure par heure, du lever du jour au coucher du soleil, sur deux plantes par couple

Figure 1 - Cinétique journalière moyenne des traitement irrigués (74^{ème} jour après émergence)



Mécanismes de résistance du mil à la sécheresse

variété-traitement : la lumière incidente au quantum-mètre ; la conductance stomatique (Cs) au poromètre Delta T sur la face supérieure et inférieure de la 3ème feuille à partir de l'apex et le potentiel hydrique foliaire à la presse à membrane sur la 4ème feuille (Fig. 1).

- Une étude en phase d'équilibre (11h30 à 15h30), au cours de laquelle nous mesurons les mêmes paramètres, mais sur quatre plantes par couple variété-traitement.

2.5.2. Au laboratoire

Les mesures effectuées au laboratoire (teneur relative en eau et courbes pression-volume) sont calées sur les cinétiques ; les échantillons prélevés proviennent des poquets suivis au cours de la journée.

Teneur relative en eau

Ce paramètre qui correspond au rapport poids frais - poids sec / poids saturé - poids sec, est déterminé sur la feuille 2 prélevée en milieu de journée.

Courbes pression-volume

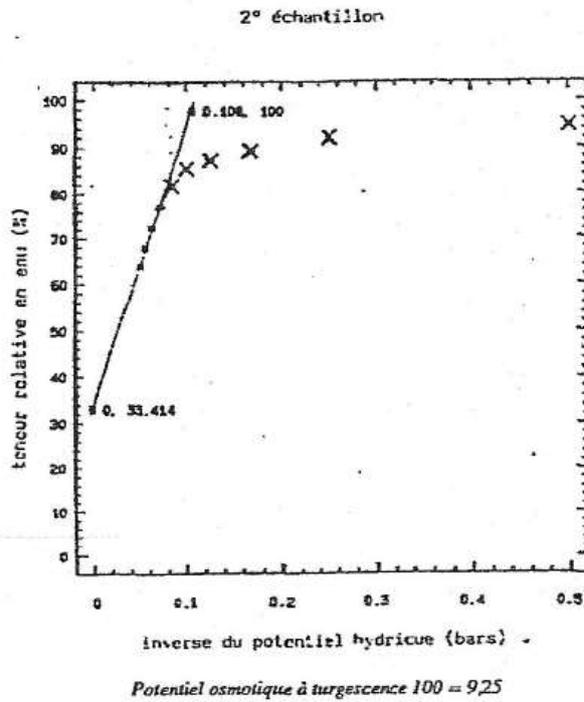
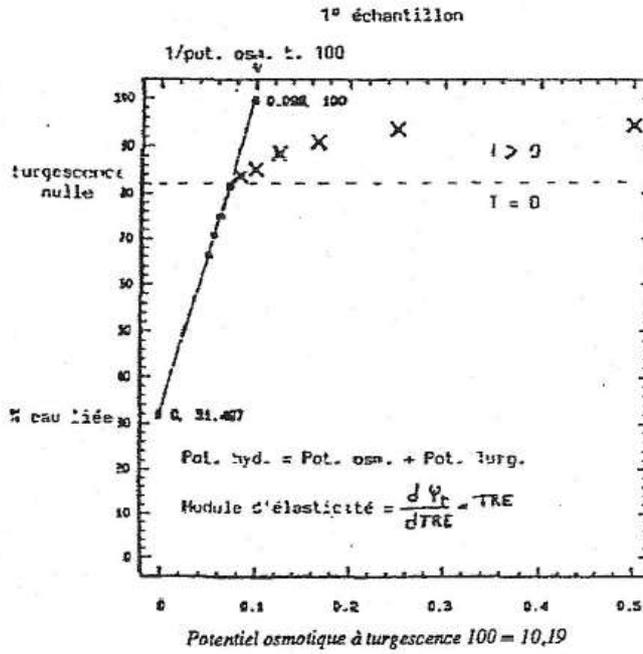
En fin de cinétique, les feuilles 3 qui ont servi aux mesures de conductance, sont récupérées et mises à réhydrater toute la nuit. Le lendemain, on réalise des courbes pression-volume (relation potentiel hydrique-teneur relative en eau) sur ces échantillons en progressant par palier de 2 bars jusqu'à 20 bars.

Ces relations sont exprimées selon la représentation préconisée par Richter (1979), soit l'inverse du potentiel hydrique en fonction de la teneur relative en eau (Fig. 2). Par régression linéaire sur la partie rectiligne de la relation (turgescence nulle), on peut déduire les paramètres suivants :

- le pourcentage d'eau liée aux membranes ;
- la teneur relative en eau à turgescence nulle ;
- le potentiel osmotique à turgescence maximale ;
- le module d'élasticité membranaire moyen entre la turgescence maximale et la turgescence nulle.

Lors de la déshydratation, le potentiel de turgescence peut être maintenu selon deux mécanismes : l'ajustement osmotique, qui se traduit par une augmentation des potentiels osmotiques précités, et l'augmentation de l'élasticité membranaire qui se traduit par une baisse du module d'élasticité.

Figure 2 - Courbes pression-volume (ICMVIS 85327 après 19 jours de contrainte)



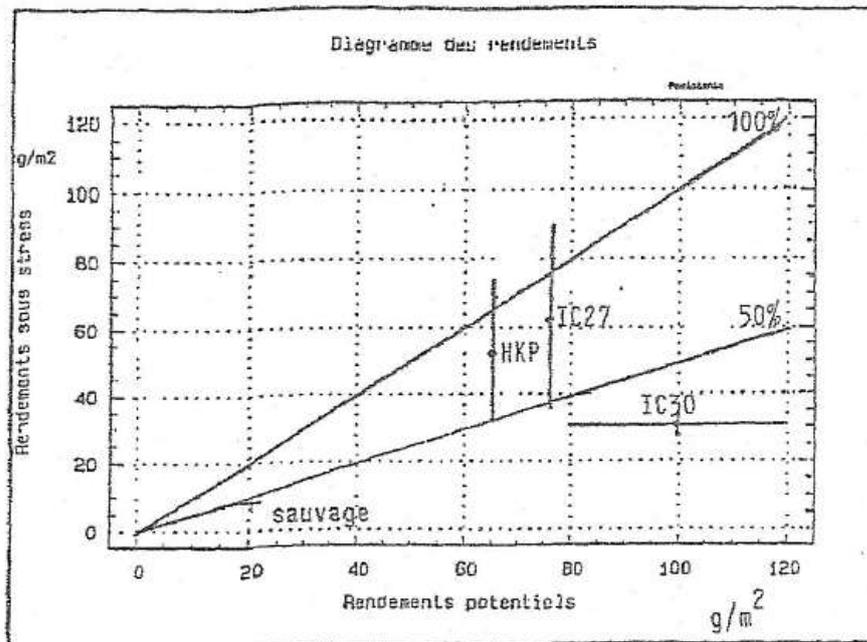
RÉSULTATS ET INTERPRÉTATIONS

1. Elaboration du rendement

1.1. Baisse relative de rendement observées

Sur la figure 3, sont représentés les rendements sous stress hydrique en fonction des rendements témoins (ETM), la bissectrice correspond à une résistance de 10%.

Figure 3



On observe, outre de faibles rendements potentiels associés à un allongement du cycle (110 jours au lieu de 90) vraisemblablement liés à des températures insuffisantes :

- Une variabilité des rendements très importante avec des coefficients de variation (CV) inter-parcelle de $\pm 15\%$ en irrigué et de $\pm 30\%$ en stressé. D'autre part, les plus grands CV sont systématiquement associés aux meilleures performances variétales, confirmant l'idée que cette variabilité phénotypique constitue le mécanisme de base d'adaptation du mil à la sécheresse (Siband, 1980).

- Une dispersion variétale intéressante de la baisse relative de rendement face à un déficit hydrique moyen ($ETR/ETM = 50\%$) mais de

longue durée (50 j) : ICMVIS 85327 et HKP, - 25% ; sauvage, - 60% ; ICMVIS 86330, - 70%.

La résistance à la sécheresse des variétés étant définie comme la capacité du matériel végétal à limiter la chute de rendement sous stress, on obtient le classement suivant :

Indice de résistance (rendement sous stress/ rendement potentiel) x 100	HKP-IC27 >>> 80% "résistants"	SV > 40% "sensibles"	IC30 30% "sensibles"
---	-------------------------------------	----------------------------	----------------------------

Sur les variétés cultivées, ce classement est inverse de celui obtenu par l'ICRISAT lors de la contre-saison chaude 88, mais présente la même opposition variétale. Il est, par contre, en accord avec les observations de l'INRAN sur la résistance de la variété HKP.

Pour le mil sauvage, le stress hydrique a en fait débuté avant sa floraison (environ 80 j), plus tardive que celle des cultivées (60 ± 2 j) qui a déterminé l'arrêt de l'irrigation.

1.2. Paramètres du rendement

Au niveau des paramètres du rendement, il apparaît une corrélation forte entre la résistance au stress et la capacité des variétés à limiter la chute du nombre de grains par mètre carré (Fig. 4). Ce résultat est en accord avec les travaux de l'ICRISAT en Inde (Bidinger et al., 1987) et plus récemment au Niger (Fussel et al., en cours de publication). Dans nos conditions de culture semi-intensives, ce caractère est assez fortement lié au maintien du nombre d'épis par mètre carré (Fig. 5).

Parallèlement, la chute du poids de 1 000 grains est faible (- 9%) ; il passe de 11,4 g pour les irrigués à 10,4 g en moyenne pour les stressés.

Cependant, les courbes de remplissage des grains (épis des brins principaux), confirme la sensibilité supérieure de la variété IC30 (Fig. 6, 7 et 8).

MÉCANISMES PHYSIOLOGIQUES DE RÉSISTANCE

L'étude des mécanismes de résistance révèle pour l'ensemble des variétés :

- Une accélération de la sénescence foliaire (Fig. 9) dont l'intensité est proportionnelle à la chute de rendements des variétés.

Mécanismes de résistance du mil à la sécheresse.

Figure 4

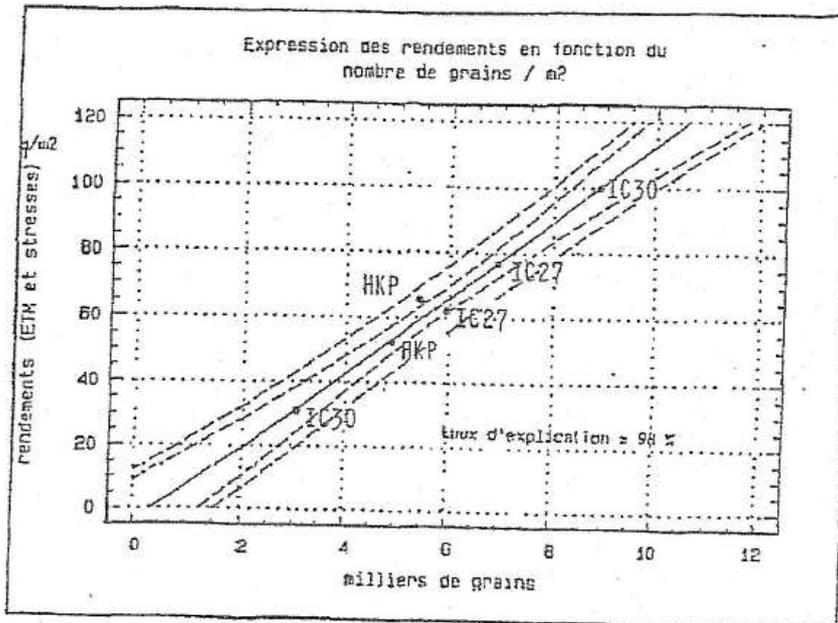


Figure 5

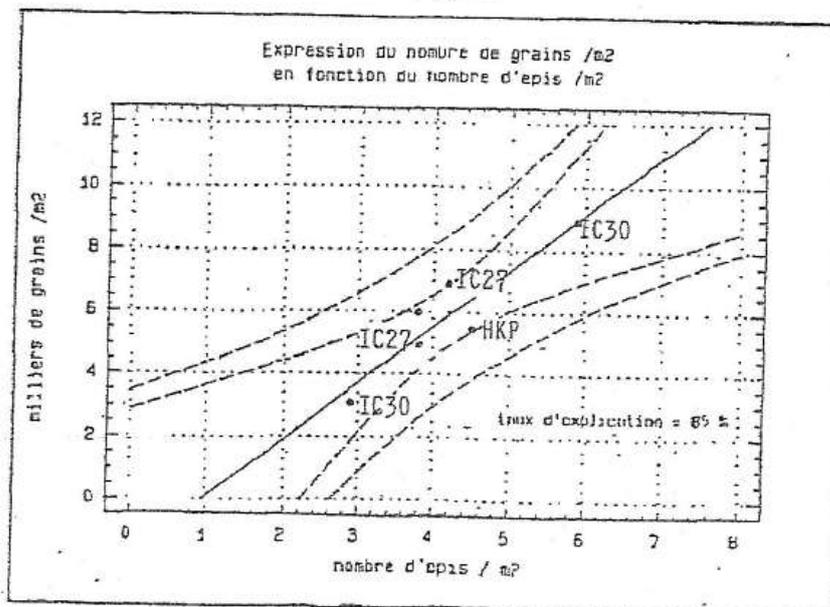


Figure 6

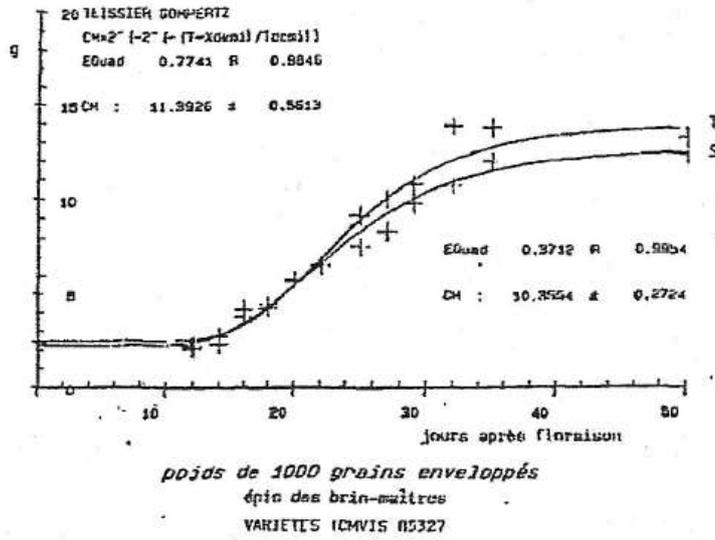
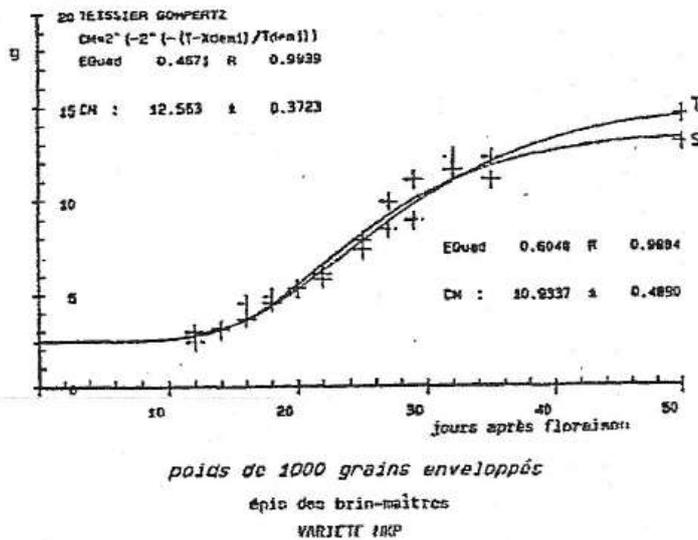
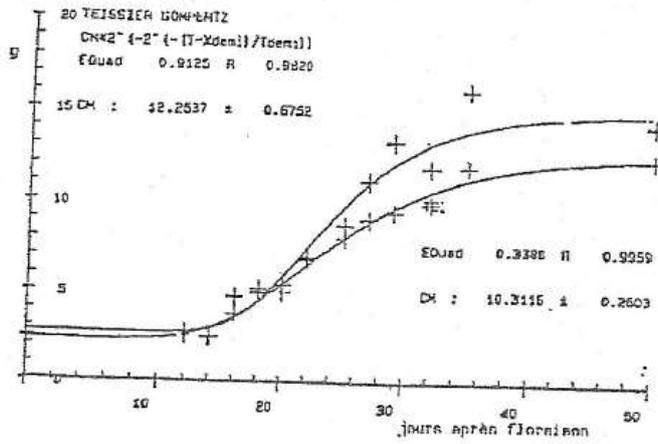


Figure 7



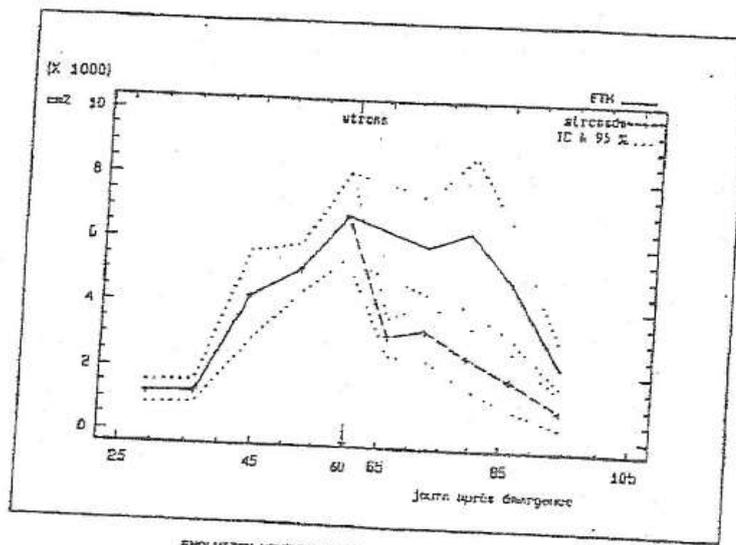
Mécanismes de résistance du mil à la sécheresse.

Figure 8



• poids de 1000 grains enveloppés
 épis des bris-mâitre
 VARIÉTÉ ICMVIS 8633U

Figure 9



EVOLUTION MÉDIANE DE LA SURFACE FOLIAIRE VERTÉ

- Une néogenèse racinaire post-florale importante (Fig. 10), corrélée avec une mobilisation de réserves hydriques plus profondes qui permet d'expliquer la stabilisation du déficit hydrique (ETR/ETM) à 50% après 15 jours de contrainte.

- Un faible stress hydrique sur les dernières feuilles du brin principal, avec en milieu de journée, une régulation stomatique maximum de 30% et un potentiel hydrique moyen de - 0,6 MPA.

Les courbes pression-volume établies sur ces mêmes feuilles, montrent de faibles variations des paramètres relatifs au potentiel de turgescence (potentiel osmotique et module d'élasticité membranaire).

En terme de différenciation variétale, l'analyse globale des résultats (cf. tableau récapitulatif) laisse apparaître deux types de comportement physiologique corrélés à la baisse relative des rendements :

- Un type "tolérant à la déshydratation" (ICMVIS 85327 et HKP), caractérisé par de faibles réactions physiologiques au stress, qui tend à réduire moins rapidement ses capacités photosynthétiques. Ce comportement s'est avéré le plus performant dans nos conditions de stress moyen.

- Un type "sensible à la déshydratation" (ICMVIS 86330 et Sauvage), caractérisé par des réactions physiologiques plus marquées (sénescence foliaire plus forte, régulation stomatique plus précoce, début d'ajustement osmotique et augmentation du module d'élasticité membranaire), qui tend à réduire plus rapidement ses capacités photosynthétiques.

Ce comportement qui conduit à économiser l'eau disponible dans le sol selon une stratégie de type "survie", s'est avéré le moins performant, mais pourrait être plus favorable dans des conditions de stress sévère.

Cette dernière hypothèse permettrait d'expliquer les résultats agronomiques inverses obtenus par l'ICRISAT en contre-saison chaude.

CONCLUSIONS ET PERSPECTIVES

1. Importance qualitative des mesures physiologiques

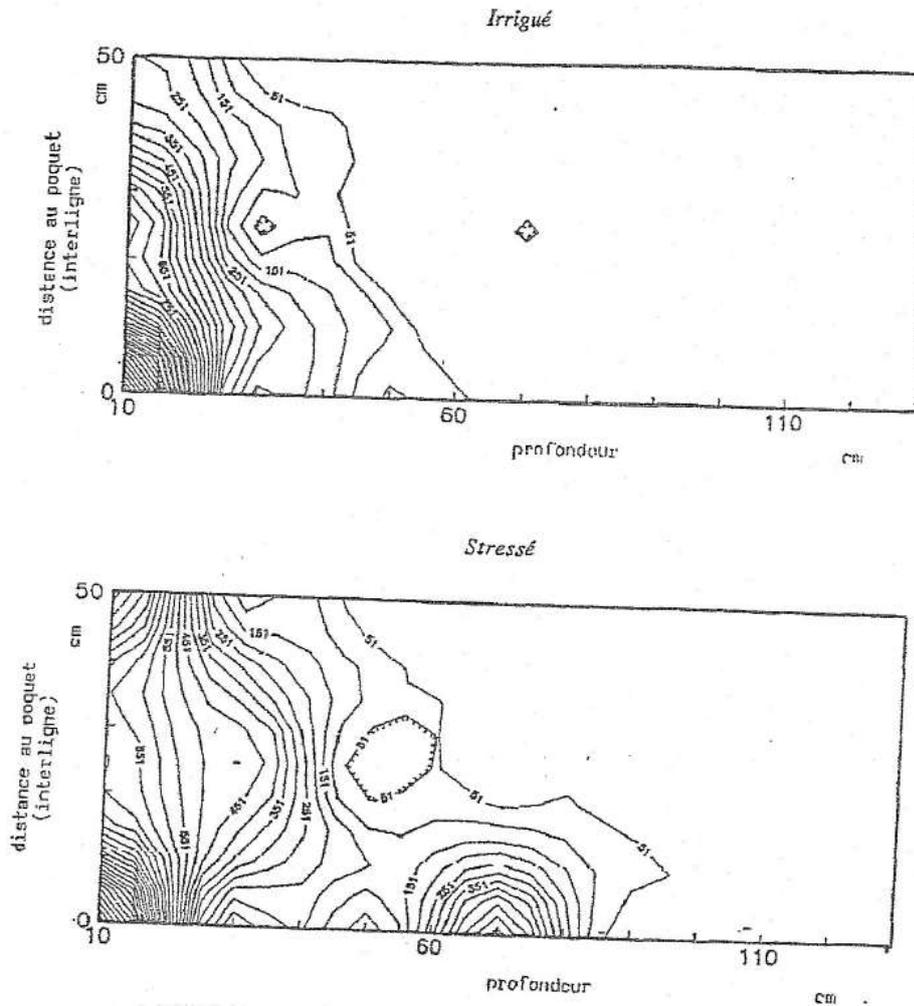
Même si les mécanismes physiologiques de résistance à l'échelle foliaire sont peu importants quantitativement pour le mil (Henson, 1982 ; Laffray et al, 1986), les différences variétales observées peuvent recéler une information qualitative fondamentale quant à leur type de comportement hydrique (exemple ICMVIS 86330, ICMVIS 85327 et HKP).

2. Intégration du fonctionnement physiologique global du poquet

Compte tenu de l'importance des brins secondaires dans les mécanismes de résistance au stress hydrique, il apparaît nécessaire de ne pas

Mécanismes de résistance du mil à la sécheresse.

Figure 10 - Isodensité racinaire à maturité (mg.ms/dm^3 sol) sur variété de mil IC27. Coupe transversale à la ligne de semis.



se limiter au seul brin-maître principal et d'essayer d'intégrer le fonctionnement physiologique global du poquet.

En effet, les feuilles du brin principal sur lesquelles nous avons effectué les mesures physiologiques sont certainement les dernières à souffrir de la contrainte par un effet de dominance mis en évidence par une sénescence foliaire plus précoce sur les brins secondaires.

3. Existence d'une importante néogenèse racinaire post-florale

L'observation d'une importante néogenèse racinaire post-florale sous stress est en opposition avec les données bibliographiques sur le sujet. Il est, en effet, généralement admis que le système racinaire n'évolue pratiquement plus à partir de la floraison (Chopart, 1983).

L'élaboration d'une méthode d'étude suffisamment fine pour différencier les variétés quant à ce processus, apparaît particulièrement intéressante. Cette caractérisation morphologique pourrait être ensuite reliée à l'extraction de l'eau du sol par horizons pour chaque variété.

4. Relativité de la notion de résistance variétale à la sécheresse

Pour le mil ou tout autre culture vivrière, la résistance variétale à la sécheresse devrait traduire une caractéristique fondamentale du matériel quant à la stabilité de sa production face au stress hydrique.

Or nos résultats, comparés à ceux obtenus par l'ICRISAT, montrent que les mêmes variétés soumises à un stress terminal, peuvent conduire à une classification inverse en fonction des caractéristiques du stress (intensité, durée, ...).

- Dans l'essai ICRISAT de contre-saison chaude 1988, où le stress hydrique était de forte intensité (haute densité de peuplement, ETP de 7 mm/j, température moyenne maximum de 40°C) et d'une durée de 30 j, le classement était le suivant :

ICMVIS 86330 : "résistant"

HKP - ICMVIS 85327 : "sensibles"

- Dans l'essai IRI de contre-saison froide 1988/89, où le stress hydrique était d'intensité moyenne (densité moyenne, ETP de 5 mm/j, température moyennes maximum de 33°C), mais d'une durée de 50 j, le classement est inversé :

ICMVIS 86330 : "sensible"

HKP-ICMVIS 85327 : "résistants".

Cette contradiction démontre la relativité de la notion de résistance variétale à la sécheresse précédemment définie.

En fait, une certaine ambiguïté peut provenir d'une confusion entre la résistance à la sécheresse en terme de rendement et la résistance à la déshydratation proprement dite, laquelle serait intrinsèque aux variétés. Cette dernière constitue une aptitude du matériel à tolérer une déshydratation partielle de ses tissus, indépendamment de toute considération sur la production finale.

La résistance agronomique à la sécheresse est, par contre, la conséquence sur le rendement final du comportement physiologique de la

variété face à des conditions de stress hydrique données (positionnement dans le cycle, intensité, durée, ...).

Ainsi, comme l'ont exposé Ludlow et Muchow (1988), le choix de critères physiologiques de sélection en vue d'une meilleure stabilité de production est hautement fonction des conditions de stress attendu.

Il est en particulier fondamental d'avoir une estimation de l'état des réserves en eau du sol disponibles directement ou moyennant une progression racinaire, au moment où le déficit pluviométrique apparaît, pour discuter du comportement physiologique le mieux adapté.

5. Objectifs

Les résultats de cette expérimentation nous ont permis de préciser nos objectifs pour la suite du programme. Les recherches devront être menées suivant deux volets imbriqués :

- L'étude de la répétabilité des types de comportement hydrique associés aux différents génotypes (tolérant ou sensible à la déshydratation), dans des conditions différentes (contre-saison chaude, hivernage, ...). Il faudra plus précisément rechercher des caractères (ex : précocité, amplitude, réversibilité, ...) et des critères (résistance membranaire, stabilité enzymatique, ...) physiologiques intrinsèques aux variétés.

- L'analyse des conséquences agronomiques de ces comportements physiologiques au travers de la stratégie d'utilisation de l'eau du sol induite et des conditions pédoclimatiques du stress.

En conclusion, ce premier travail nous a permis de pressentir, en accord avec les travaux antérieurs, que le mil présente une stratégie de résistance au stress hydrique complexe fondée sur une variabilité phénotypique considérable intégrant intimement des mécanismes phénologiques, morphologiques et physiologiques.

Les modalités de ces mécanismes (précocité, amplitude, réversibilité, ...) pourraient être associées à un type de comportement physiologique variétal plus ou moins favorable au rendement final selon les conditions phénologiques et pédoclimatiques du stress.

Cette stratégie complexe du mil, vraisemblablement liée à son faible niveau de domestication, génère à la fois, sa difficulté d'approche et son intérêt fondamental dans l'étude des mécanismes d'adaptation de la production céréalière aux risques de la sécheresse.

Références bibliographiques

- Bidinger F.R., Mahalakshmi V., Rao G.D.P., 1987 - Assesment of drought resistance in pearl millet. II - Estimation of genotype response to stress. *Aust. J Agr. Res.*, 38, 49-59.
- Chopart J.L., 1983 - Etude du système racinaire du mil dans un sol sableux du Sénégal. *Agr. Trop.*, 38-1, 37-51.
- Fussel L.K., Bidinger F.R., Bieler P., publ. en cours - Research and development crop physiology and breeding for drought tolerance. *Field Crop.Res.*
- Henson I.E., 1982 - Osmotic adjustment to water stress in pearl millet in a controlled environment. *J Exp. Bot.*, 33, 78-87.
- Laffray D., Saintguily A., Louguet P., 1986 - Etude comparative des effets d'une contrainte hydrique progressive sur les paramètres hydriques de trois variétés de mil. *Comm. Coll. de Djerba, Tunisie* (sept. 1986).
- Ludlow M.M., Muchow R.C., 1988 - Critical evaluation of the possibilities for modifying crops for high production per unit of precipitation. *In : Drought research priorities for the dryland tropics*, ICRISAT Ed.
- Siband P., 1983 - Essai d'analyse du fonctionnement du mil en zone sahélienne. *Agr. Trop.*, 38-1, 27-35.
- Sivakumar M. V.K., 1986 - Soil climatic zonation for west african semi-arid tropics implication of millet improvement. Paper presented at the regional millet workshop, sept. 1986, Niger.

1.3. Méthode d'estimation de la biomasse racinaire sous le poquet

La détermination en plein champ de la biomasse racinaire totale et de son évolution sous stress a été une problématique qui a fait l'objet d'importants travaux préliminaires, en collaboration avec le Département d'écophysiologie végétale et microbiologie du Commissariat à l'Energie Atomique (CEA) français (Direction des Sciences du Vivant). L'aptitude d'une plante à résister à la sécheresse dépend aussi de sa capacité à extraire les réserves en eau des profondeurs du sol, c'est-à-dire à étendre son système racinaire vers les horizons plus bas. Ce travail, qui est une mise au point méthodologique a permis de valider une méthode de quantification de la biomasse racinaire sous le poquet, afin de pouvoir suivre sa dynamique en relation avec la disponibilité en eau du sol. La méthode tient compte de l'hétérogénéité de la distribution de l'eau d'irrigation par goutte à goutte. Cette méthodologie permet avec moins de 40 mesures de carottage par poquet, d'une part d'approcher la dispersion spatiale du système racinaire du mil (*Pennisetum glaucum* (L.) R. Br.), et d'autre part d'évaluer la masse racinaire sous le poquet. Cette méthode est basée sur l'étude de la représentation cartographique de la densité racinaire, détaillée par horizon pour plusieurs positions par rapport à la ligne de semis. Elle est ensuite appliquée à la comparaison des profils racinaires des plantes ayant ou non subi un stress hydrique après la floraison. Cette méthode a permis de simplifier sérieusement la quantité de travail (2 m³ de terre par poquet). Ce résultat a fait l'objet d'une publication **SANTUCCI P., THIERY JM., DAOUDA OUSMANE S., DO F., MARINI P. (1992).** *"Contribution à l'étude des profils racinaires du mil (*Pennisetum glaucum*) et méthode de calcul de la biomasse racinaire sous le poquet"*. Revue du Réseau pour l'Amélioration de la Productivité en Milieu Aride, 1992, Vol. 4. pp 25-34.

**CONTRIBUTION A L'ETUDE DES PROFILS RACINAIRES
DU MIL (*PENNISETUM GLAUCUM* (L.) R. BR.) ET
METHODE DE CALCUL DE LA BIOMASSE RACINAIRE
SOUS LE POQUET**

**P.Santucci¹, J. M. Thiery², S. Daouda Ousmane¹
F. Do¹, P. Marini¹**

1 Département de Radio-Agronomie, Institut des Radio-Isotopes, Université de Niamey, B. P. 1027, Niamey (Niger)

2 Département de Physiologie Végétale et des Ecosystèmes, Centre d'Etudes Nucléaires de Cadarache, 13108 Saint Paul-Les-Durance (France)

(reçu le 9 Mars 1992, accepté le 9 Juillet 1992)

Résumé : *Cet article se propose de développer une méthodologie permettant, avec moins de 40 mesures de carottage par poquet, d'une part d'approcher la dispersion spatiale du système racinaire du mil (*Pennisetum glaucum* (L.) R. Br.), et d'autre part d'évaluer la masse racinaire sous le poquet. Cette méthode est basée sur l'étude de la représentation cartographique de la densité racinaire, détaillée par horizon pour plusieurs positions par rapport à la ligne de semis. Elle est ensuite appliquée à la comparaison des profils racinaires de plantes ayant ou non subi un stress hydrique après la floraison.*

Mots-clés : mil, système racinaire, modélisation, stress hydrique terminal

**CONTRIBUTION TO THE STUDY OF MILLET
(*PENNISETUM GLAUCUM* (L.) R. BR.) ROOT PATTERNS
AND CALCULATION METHODOLOGY OF THE ROOT
BIOMASS BELOW THE SEED HOLE.**

Summary : *Contribution to studying the millet (*Pennisetum glaucum*) root patterns and calculation methodology of the root biomass below the seed hole, with less than 40 measurements. The methodology is based on the cartographic pattern study of the root density, which is detailed by horizon, for several positions with regard to the sowing line. It is then applied to the comparison of the root patterns of plants, which have undergone an hydric stress after the flowering, or not.*

Key-Word : Millet, root system, modeling, terminal hydric stress.

INTRODUCTION

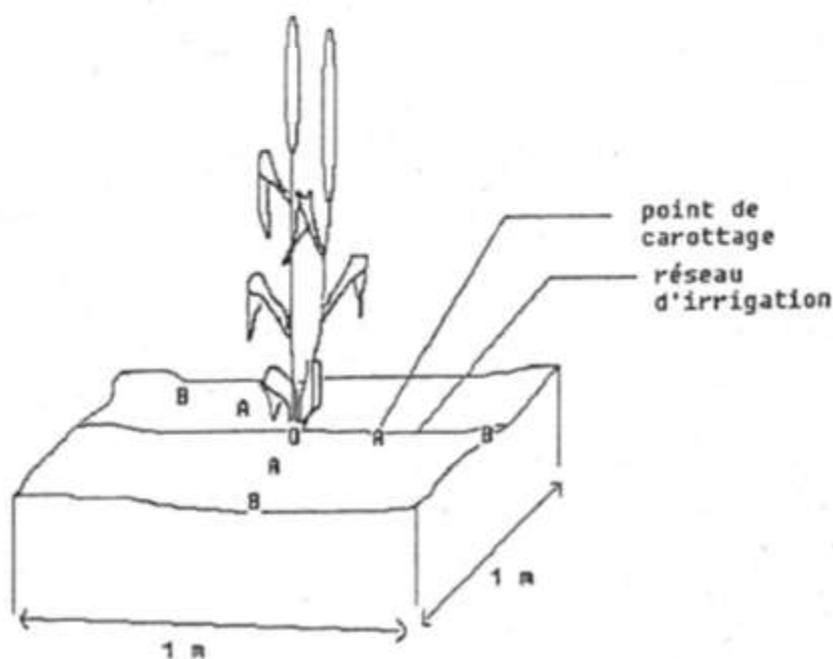
Le système racinaire, par sa fonction d'extraction de l'eau du sol, joue un rôle important dans la résistance des cultures à la sécheresse. Dans le cadre d'une étude en plein champ des réactions de différents cultivars de mil à une contrainte hydrique post-florale, nous avons recherché le moyen de caractériser en un temps relativement court la distribution spatiale de la biomasse racinaire d'un grand nombre de poquets. Parmi les nombreuses méthodes d'étude quantitative des systèmes racinaires (Böhm, 1979), celles fondées sur l'utilisation de carottages apparaissent alors les plus appropriées. Cet article expose donc la méthode choisie pour une telle modélisation de l'enracinement, ainsi que pour l'estimation de la biomasse racinaire dans un volume de sol donné.

MATERIEL ET METHODES

Protocole expérimental et prise de l'information.

Le mil (variété ICMVIS 86330) a été semé en contre-saison à raison d'un poquet par mètre carré. L'apport d'eau a été réalisé au moyen de goutteurs disposés le long de la ligne de semis (2 par m²) débitant 4 l.h⁻¹. Sur une moitié de l'essai, les témoins ont été irrigués jusqu'à maturité et sur l'autre moitié, un déficit hydrique terminal a été imposé par arrêt de l'apport d'eau à la floraison.

figure 1 : Poquet d'étude



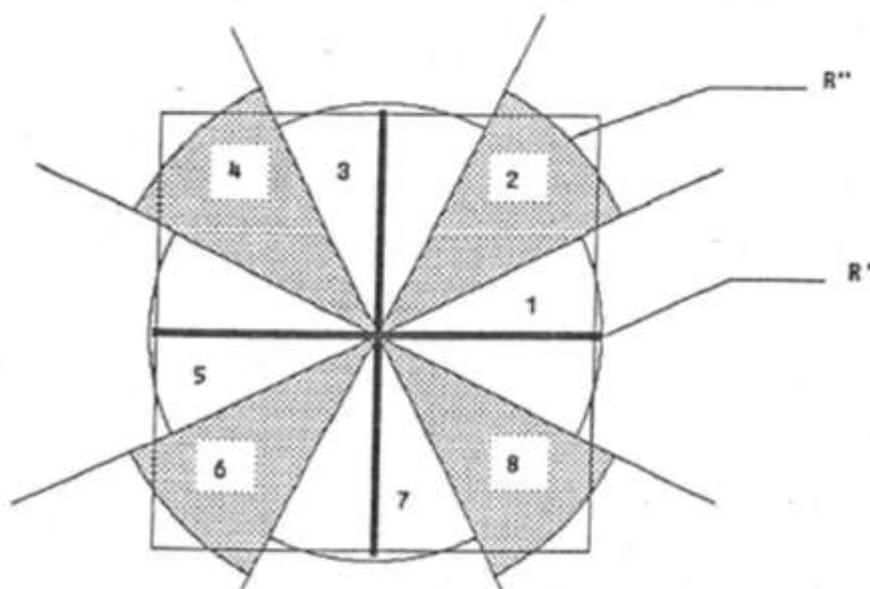
L'enracinement a été caractérisé à maturité sur 4 poquets de chaque traitement hydrique. Pour chaque poquet (fig 1), on a déterminé la densité volumique de racines ρ exprimée en $\text{g}_{\text{matière sèche}} \cdot \text{m}^{-3}$ en sept profondeurs et sur cinq points de carottage : les prélèvements ont été réalisés tous les 20 cm jusqu'à 140 cm de profondeur, aux distances de 0 cm, 25 cm et 50 cm de la plante dans le plan parallèle à la ligne de semis comme dans le plan orthogonal, le collet n'étant pas compté dans ces mesures. D'après ces 35 mesures par poquet, il est donc possible de donner une représentation de l'enracinement en cartographiant les lignes d'isodensité ($\rho = \text{constante}$) dans les deux plans considérés, en utilisant par exemple la méthode du krigeage d'un logiciel cartographique comme SURFER 4 (1990a).

Détermination de la masse racinaire sous le poquet

Le principe de calcul de la masse de racines est l'intégration de la densité volumique sur l'ensemble du poquet.

Soit p la profondeur du profil, i.e. la profondeur maximum d'enracinement, pour laquelle $\rho(p)=0$ (condition aux limites), et soit $d_{1/2}$ la demi-distance inter-poquet : on considère alors le parallélépipède de base carrée $2d_{1/2} \times 2d_{1/2}$ et de longueur p , en remarquant que cette limitation à $d_{1/2}$ ne doit pas être gênante dans la mesure où il y a, en moyenne, autant de racines du poquet considéré au-delà de $d_{1/2}$ que de racines du poquet voisin qui pénètrent dans le profil étudié.

Fig 2 : Division de la base carrée du poquet en huit octants



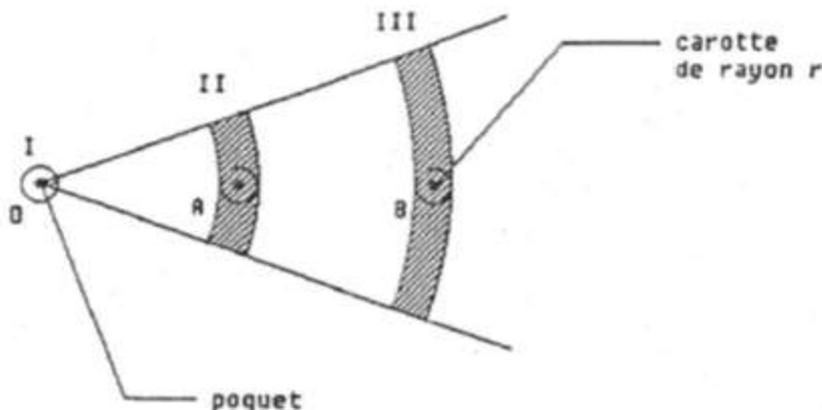
La base carrée est divisée en huit octants (fig 2) afin de tenir compte de la dissymétrie due au réseau d'irrigation (2 plans d'étude), et éventuellement de mesures effectuées sur la bissectrice. Pour le cas où il n'y aurait pas de mesure sur cette bissectrice, i.e. celui qui nous intéresse dans le cadre de l'étude présente, on prendrait comme valeurs les moyennes des mesures des deux plans axiaux orthogonaux.

L'idée directrice est d'étudier ensuite individuellement chaque octant, en le "repliant comme un éventail" pour projeter la densité volumique r sur chacun des trois plans de base et calculer une densité surfacique s : en effet, chaque mesure issue d'un carottage n'est qu'une estimation de la densité racinaire locale au point de mesure, pour le volume prélevé; du fait de la quasi-symétrie axiale centrée sur l'axe de la plante, la réalité doit cependant tenir compte de l'énorme poids "statistique" des prélèvements axiaux (chacun de ces prélèvements concerne en fait les huit octants, et non pas un seul) et du faible poids des prélèvements les plus éloignés de la plante. Ensuite, pour obtenir la masse, il suffira d'intégrer les plans de projection, puis de sommer les masses de chaque octant.

Octants centrés sur la ligne de semis.

Soit r le rayon des carottes, et soit h leur épaisseur. Soient O , A et B les points de carottage, il faut considérer 3 zones concentriques (fig 3) I, II et III. On pose $A = d(O,A)$ et $B = d(O,B)$. On se propose de calculer le volume associé aux secteurs hachurés sur une épaisseur de carotte.

figure 3: Etude des trois secteurs sur un octant



- I. le secteur de la carotte O est de volume $v_1 = \frac{1}{8} \pi r^2 h$;
 II. sachant que l'aire d'une couronne de rayon moyen R et de largeur e est :

$$\pi \left[\left(R + \frac{e}{2} \right)^2 - \left(R - \frac{e}{2} \right)^2 \right] = 2\pi R e, \text{ la surface du secteur centré sur A et de largeur } 2r \text{ est :}$$

$$s_2 = \frac{1}{8} 2\pi A 2r = \frac{1}{2} \pi A r,$$

et le volume v_2 du secteur II est :

$$v_2 = \frac{1}{2} \pi A r h;$$

- III. de même, $v_3 = \frac{1}{2} \pi B r h$ par symétrie algébrique de A et B.

Si m_i est la masse de racines dans chaque volume v_i , $m_i = v_i \rho_i$ (ρ_i densité volumique mesurée), la densité surfacique σ résultant de la projection de ρ sur le plan médian de l'octant est alors égale à la masse du secteur sur sa section verticale:

$$I. \sigma_1 = \rho_1 \frac{1}{8} \pi r^2 h / (rh) = \rho_1 \left(\pi \frac{r}{8} \right);$$

$$II. \sigma_2 = \rho_2 \frac{1}{2} \pi A r h / (2rh) = \rho_2 \left(\pi \frac{A}{4} \right);$$

$$III. \sigma_3 = \rho_3 \left(\pi \frac{B}{4} \right).$$

On retrouve en fait le résultat géométrique logique que la densité surfacique est égale à la densité volumique multipliée par la longueur de l'arc moyen; les coefficients correctifs c_i de $\sigma_i = \rho_i c_i$ sont par conséquent :

$$c_1 : \text{arc moyen de rayon } \frac{r}{2} : \frac{1}{8} 2\pi \frac{r}{2} = \pi \frac{r}{8}$$

$$c_2 : \text{arc moyen de rayon A} : \frac{1}{8} 2\pi A = \pi \frac{A}{4} ;$$

$$c_3 : \text{arc moyen de rayon } B : \pi \frac{B}{4} .$$

Pour trouver la masse totale de racines dans l'octant, il faut intégrer sur la surface S du plan vertical considéré :

$$m_{\text{octant}} = \iint_S \sigma(x,y) \, dx \, dy ;$$

le plan étant défini par sa profondeur p et par son rayon R', tel que la surface de l'octant soit identique à celle du triangle isocèle de base définie par la médiatrice entre deux poquets voisins :

$$\pi \frac{R'^2}{8} = d_{1/2}^2 \tan \frac{2\pi}{16}, \text{ d'où}$$

$$R' = d_{1/2} \sqrt{\frac{8}{\pi} \tan \frac{\pi}{8}}$$

Octants centrés sur la ligne orthogonale à la ligne de semis.

Puisque la géométrie est la même, les calculs sont strictement identiques au cas précédent.

Octants diagonaux

Les calculs sont similaires jusqu'au rayon d'intégration R* qu'il faut calculer : surface (octant diagonal) + surface (octant axial) = surface (quadrant)

$$\text{(fig 2), d'où surface (octant diagonal)} = d_{1/2}^2 - d_{1/2}^2 \tan \frac{\pi}{8} = \pi \frac{R^{*2}}{8}$$

$$\text{donc } R^* = d_{1/2} \sqrt{\frac{8}{\pi} (1 - \tan \frac{\pi}{8})}.$$

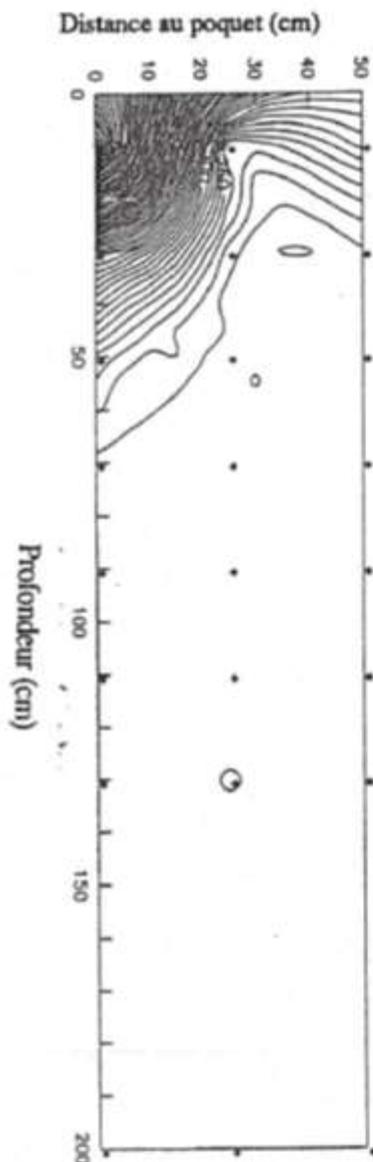
Dans les trois cas, la masse de chaque octant peut être obtenue par l'intégration numérique de la densité surfacique (en utilisant par exemple le module d'intégration du logiciel SURFER 4 (1990 b) sur la cartographie de σ , calculée à partir des valeurs σ_i), soit sur le profil complet, soit seulement sur certains horizons si besoin est. Dans le cas de la totalité du profil racinaire, la somme des masses partielles donne la masse totale :

$$M_{\text{totale}} = 2m_{\text{octant parallèle à la ligne de semis}} \\ + 2m_{\text{octant orthogonal à la ligne de semis}} \\ + 4m_{\text{octant diagonal}}.$$

RESULTATS ET DISCUSSION

Les résultats présentés concernent directement la moyenne des 4 poquets échantillonnés pour chaque traitement hydrique. On rappelle aussi à nouveau que le collet n'a pas été compté dans les mesures.

Figure 4 : densité racinaire IC30 irrigué ($g.m^{-3}$)

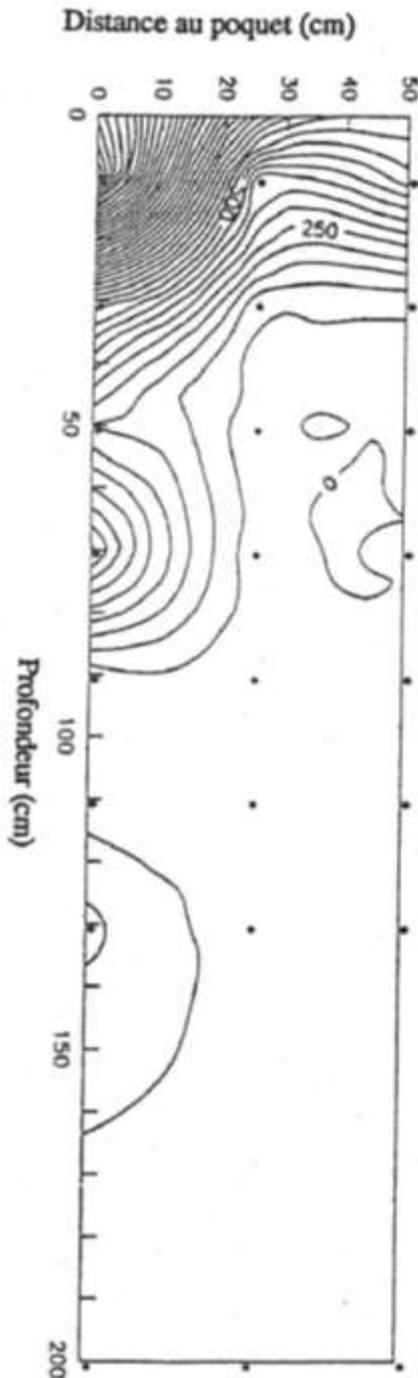


Représentation de la densité volumique

En considérant que $\rho = 0$ dès que la profondeur dépasse 2m (hypothèse confirmée *a posteriori* par les prélèvements), on a pu représenter les cartes moyennes d'isodensité pour le mil irrigué et pour le mil stressé (respectivement fig 4 et 5).

L'observation de ces deux représentations nous permet de constater que le mil irrigué développe son système racinaire sur moins de 70 cm de profondeur, avec une très forte concentration du chevelu dans les 20 à 30 cm; l'extension latérale est peu importante, on peut donc noter que cette architecture est entièrement consacrée à l'optimisation de la prise de l'eau en provenance des goutteurs disposés en surface. En revanche, le mil stressé se caractérise par son développement spatial conséquent : l'enracinement est significatif jusqu'à 150 cm, avec une forte concentration jusqu'à 70 cm, et, de plus, le développement latéral est plus important que dans le cas irrigué ; cette architecture est donc dédiée à la maximalisation de l'absorption d'eau soit par une recherche en profondeur, soit par le développement

Figure 5 : densité racinaire IC30 stressé ($g.m^{-3}$)



sub-surfacique en prévision d'un éventuel apport météorique ou résultant d'une condensation superficielle.

Calcul des masses racinaires

En prenant $p = 200$ cm, $d_{1/2} = 50$ cm, $r = 3,75$ cm, $A = 25$ cm, et $B = 50$ cm, on trouve après calcul les coefficients de correction $c_1 = 1,47$ cm, $c_2 = 19,64$ cm et $c_3 = 39,27$ cm, ainsi que les rayons d'intégration $R' = 51,35$ cm et $R'' = 61,07$ cm.

Le tableau 1 donne les principaux résultats concernant les masses, sans qu'il soit ici question de discuter de leur valeur absolue dans la mesure où cette étude a essentiellement un objectif méthodologique; on rappelle que dans cette étude les valeurs sur l'octant diagonal résultent d'une intrapolation à partir des densités axiales. On constate que le mil stressé développe, à terme, plus de masse racinaire que le mil irrigué (environ 30 % de plus), en accord avec son développement spatial plus important; ce développement est d'ailleurs homogène autour de l'axe vertical de la plante (symétrie axiale).

Dans le cas irrigué, on s'aperçoit qu'il existe une très forte dissymétrie induite par le réseau d'irrigation: la masse de racines le long de ce réseau représente pratiquement le double de la masse le long de l'axe orthogonal; la masse racinaire du mil irrigué est donc bien regroupée dans la zone où la disponibilité en eau est la plus forte.

Tableau 1 : Masses racinaires sous le poquet

niveau du facteur	masse octant parallèle à la ligne de semis (g)	masse octant orthogonal à la ligne de semis (g)	masse octant diagonal (estimation) (g)	masse total (g)
irrigué	14,1	7,6	15,2	104
stressé	14,7	13,2	19,5	134

Il faut bien remarquer qu'il n'est guère possible d'aller plus loin dans l'analyse de ces résultats : cette nouvelle méthode n'a été testée que sur quelques répétitions, en quelque sorte comme application numérique du développement théorique; et si l'on s'aperçoit que même à ce niveau il est déjà possible de dégager certaines conclusions, il est bien entendu nécessaire de mettre en place des plans expérimentaux plus puissants, afin notamment d'affiner notre connaissance des facteurs déterminant la mise en place des structures racinaires du mil.

CONCLUSION

La méthode qui représente l'enracinement par des lignes d'isodensité obtenues par krigeage, et calcule la masse racinaire par une intégration appropriée, apparaît opérationnelle : elle permet donc d'appréhender consécutivement l'aspect qualitatif et l'aspect quantitatif de l'enracinement du mil. Il reste maintenant à la valider par référence au monolithe de sol complet, détaillé par horizon (Chopart, 1983). Cette expérience est en cours;

P. Santucci, J. M. Thiery, S. Daouda Ousmane, F. Do., P. Marini

elle permettra d'estimer la précision de la méthode, en liason avec les différents niveaux de simplification des carottages.

BIBLIOGRAPHIE

BÖHM W., 1979 - Methods of studying root systems. Ecological studies n° 33. Springer Verlag, Berlin. 188p.

CHOPART J. L., 1983 - Etude du système racinaire du mil (*Pennisetum typhoides*) dans un sol sableux du Sénégal. Agronomie tropical n° 38, 37 - 51.

SUFFER 4, 1990a. Pages 4-1 à 4-102 in SUFFER version 4, Référence Manual, Golden Software Inc., 809 14th street, P.O. Box 801, Golden Colorado 80402 - 0281, U. S. A.

SUFFER 4, 1990b. Pages 8-5 à 8-29 in SUFFER version 4, Référence Manual, Golden Software Inc., 809 14th street, P.O. Box 801, Golden Colorado 80402 - 0281, U. S. A.

1.4. Conclusion partielle

L'étude des mécanismes agro-morpho-physiologiques de tolérance à la sécheresse du mil a été rendue possible grâce à la mise au point d'un grand nombre de méthodes préalables. La différence génotypique au niveau de la productivité face au stress hydrique terminal est liée à la résultante d'un grand nombre de petits effets qui s'additionnent dans le même sens, renforçant la thèse de la gouvernance polygénique de la tolérance à la sécheresse chez le mil; L'analyse globale a permis de définir deux types de stratégies de réponse à la sécheresse chez le mil : un "type dépensier" et un « type économe ». Le type dépensier est celui qui, face au stress hydrique, modifie significativement l'allocation des assimilats en faveur du développement racinaire, maintient un rythme de transpiration (ouverture stomatique) et d'échange carboné, ralentit la sénescence foliaire pour maintenir l'assimilation chlorophyllienne. Cette stratégie s'est avérée intéressante pour les stress hydriques intenses mais de courte durée n'excédant pas une semaine. Le type économe est celui qui réduit les rythmes et surfaces d'échange tout en maintenant une faible assimilation. Cette stratégie s'est avérée meilleure pour les stress hydriques prolongés. Nous avons préférés pour la vulgarisation au Niger ce type de stratégie.

En effet, en phase d'installation (germination-montaison), le stress hydrique stimule une extension verticale du système racinaire avec une colonisation plus importante en profondeur. Aucune différence variétale n'apparaît dans cette réponse au déficit hydrique. En revanche, en situation d'alimentation hydrique satisfaisante, certains cultivars colonisent le sol plus profondément que d'autres durant la phase d'installation des cultures. Ceci pourrait conditionner leur comportement face à un déficit hydrique plus tardif.

En phase de remplissage des grains, l'essai de contre-saison 88-89 montre que dans un premier temps le cultivar qui supporte le mieux le stress hydrique est celui qui a la structure initiale la plus développée. En raison d'une consommation en eau importante, soutenue par l'exploitation des horizons profonds, et d'une surface foliaire verte (sources d'assimilats carbonés) supérieure, il maintient mieux la croissance des épis dans les 25 premiers jours. Ensuite, quand le déficit hydrique se prolonge, la faiblesse de la réserve en eau disponible pénalise fortement le rendement final. Cependant, l'essai de contre-saison 1990 révèle aussi un effet déterminant du stade phénologique atteint par la plante lors du déclenchement du déficit hydrique. Indépendamment de leur biomasse aérienne, les plantes ayant le développement phénologique le plus avancé au début du stress sont celles qui maintiennent la

plus forte production de grains. Il existe donc une relation entre la capacité de la plante à maintenir le rendement et celle de son système racinaire à exploiter les horizons profonds lors de la sécheresse. L'extension du système racinaire semble être liée à la structure de la plante avant le stress et notamment à l'importance de la surface foliaire verte. Ceci implique des transferts de matière sèche entre parties aériennes et racines. Or, même en situation de déficit hydrique prolongé (contre-saison 88-89), on constate que l'extraction de l'eau par les racines est loin d'être complète en deçà de 150 cm de profondeur. La croissance des racines en réponse à la sécheresse a donc une limite dans l'espace (capacité de colonisation du sol en profondeur) et dans le temps. Ce dernier point reste particulièrement obscur: il pose le problème de la coordination du développement des différents organes de la plante et de l'interaction entre phénologie et réponse au déficit hydrique.

La croissance des racines doit être synchronisée avec celle des parties aériennes, de sorte qu'à tout instant la capacité de captage (de l'eau et des éléments minéraux) du système racinaire soit suffisante pour compenser les besoins d'entretien et de croissance des parties aériennes. Ainsi, dans un sol en dessèchement, le retour des assimilâts en priorité vers les racines soutient une extension vers les horizons humides et une mobilisation des réserves en eau suffisante pour compenser le flux de transpiration. Travaillant sur le sorgho et le mil en sol sableux au Niger, Monteith (1986) trouvait qu'un rythme de croissance racinaire de $3,5 \text{ cm j}^{-1}$ était insuffisant pour une demande évaporative de l'ordre de 6 mm j^{-1} . Le niveau d'extraction de l'eau atteint par les racines était de l'ordre de $1,5 \text{ mm j}^{-1}$. Il conclut qu'en période de dessèchement, le niveau de la transpiration foliaire est probablement limité par la capacité d'extension des racines, de sorte que *le comportement des stomates et le statut hydrique des feuilles dépendent essentiellement du niveau d'activité du système racinaire*. En période végétative, les assimilâts sont utilisés soit pour la croissance et l'extension des nouvelles feuilles soit pour celles des nouvelles racines. La priorité entre ces deux voies est déterminée par les contraintes actuelles de la plante. Si les feuilles croissent plus vite que les racines, la perte excessive d'eau entraîne une fermeture stomatique qui, elle-même, réduit les processus d'échanges gazeux photosynthétiques et à terme la croissance globale. Si les racines croissent rapidement aux dépens des feuilles, la croissance globale sera limitée par la capacité d'interception lumineuse des surfaces foliaires vertes.

Quand la vitesse d'extension des racines vers les horizons humides est insuffisante (à cause par exemple du rythme insuffisant de translocation d'assimilâts vers les racines), le rythme d'extraction de l'eau du sol devient déficitaire par rapport à la demande évaporative au

niveau des feuilles. Le contenu relatif en eau et le potentiel hydrique des feuilles baissent de sorte que la plante doit jouer sur d'autres paramètres pour obtenir l'adéquation de l'offre à la demande en eau. La fermeture stomatique est le mécanisme le plus habituellement cité par les auteurs (Henson *et al.*, 1983; Laffray et Louguet, 1989; Dias Da Sylva *et al.* 1990; Do et Winkel, 1993). Cet ajustement stomatique est intervenu très tôt sur les plantes de mil stressées, presque aussitôt après le début de la contrainte hydrique, quand le potentiel hydrique foliaire est descendu à -0,8 à -1 MPa. Mais c'est seulement dans la troisième semaine de stress hydrique que les deux variétés de mil se sont distinguées, le mil IC30 ayant maintenu un niveau de transpiration plus élevé que celui de HKP. La régulation stomatique est observée chez les deux variétés de mil, elle est plus poussée chez HKP. Or, ce mécanisme peut entraîner corrélativement une réduction des échanges gazeux et une baisse de la photosynthèse et à terme, en fin de cycle, une chute du taux de croissance des épis.

Ainsi, deux mécanismes prédominants sont en relation avec la croissance des épis chez la **variété de mil IC30** : *l'arrêt précoce de l'extension des racines* au profit du remplissage des grains ; *l'amélioration de la conductance stomatique* par accélération de la sénescence foliaire avec maintien des échanges gazeux, car la sénescence foliaire attaque en priorité les feuilles basales les plus âgées dont l'assimilation carbonée est moins impliquée dans le remplissage des grains (Jacquinot, 1970).

Dans le cas de la **variété de mil HKP**, *la translocation vers les racines a été privilégiée et la vitesse d'extension des racines a favorisé un meilleur taux d'extraction de l'eau du sol pendant la première semaine de contrainte hydrique*. Ce processus a vite atteint ses limites suite au dessèchement rapide des horizons de surface les plus colonisés et la baisse consécutive de la rhizogénèse. Le contenu relatif en eau et le potentiel hydrique ont alors rapidement chuté et la surface foliaire verte maintenue encore importante n'a pas permis une régulation stomatique adéquate. Ainsi *la baisse des rendements chez la variété de mil HKP s'explique principalement par le détournement inefficace des assimilats vers les racines*, aux dépens des épis; la chute du taux de remplissage des grains, et en fin de compte la diminution de la croissance globale par altération du statut hydrique des feuilles.

De l'analyse de ce travail, on peut tirer les conclusions suivantes :

- ✚ Le maintien de l'assimilation chlorophyllienne doit être une cible pour le sélectionneur pour la tolérance du mil à la sécheresse ;
- ✚ La répartition « équilibrée » des assimilats en faveur du remplissage des grains en situation de stress hydrique terminal est également une cible pour le sélectionneur.

Tous ces deux aspects sont variables en fonction du type de stress hydrique (son intensité, sa durée, la période à laquelle il intervient, etc.). Malheureusement, les changements climatiques en cours tendent vers une accentuation de cette variabilité, surtout en zones arides et semi-arides (Scheff and Frierson, 2012 ; Solomon *et al.*, 2007). Ceci complique très sérieusement la tâche pour la recherche pour la tolérance à la sécheresse chez le mil.

La structure du poquet au moment de l'avènement du stress hydrique semble déterminante pour l'efficacité de la réponse de la plante. Ainsi, la recherche de l'uniformité du développement du poquet et de la culture entière devient également une cible pour le sélectionneur. Ceci implique l'amélioration des techniques culturales, qui restent encore rudimentaires à cause de la pauvreté des agriculteurs.

Le mil est une plante à tallage et le rôle des talles secondaires (en termes de transfert d'assimilats vers le brin-maître) est encore loin d'être éclairci.

CHAPITRE 2 : AMELIORATION DE LA NUTRITION HYDRIQUE ET MINERALE DES PLANTES

2.1. Introduction

Au Niger, les rendements agricoles demeurent encore faibles et en cause les contraintes environnementales (IFPRI, 2010). Avec les changements climatiques en cours, ces contraintes environnementales seraient encore plus variables et plus sévères au Sahel. Les rendements agricoles se stabilisent à des niveaux faibles et la production globale ne croit que par l'expansion de l'aire de culture vers des terres encore plus marginales. La forte pression démographique de 3,9% l'an (INS, 2014), le développement urbain ainsi que l'avancée du désert ont entraîné une forte pression sur la terre et la diminution de la période de jachère et, conséquemment, de la fertilité des sols. Dans ce contexte, l'augmentation de la productivité des cultures et l'alimentation des populations demeurent un grand défi. Depuis l'invention des engrais minéraux au 19^{ème} siècle, leur utilisation adéquate a été responsable en grande partie de l'amélioration de la productivité agricole au niveau mondial. Ceci a soutenu la révolution verte en Asie et en Amérique Latine. En Afrique sub-saharienne, les recommandations des engrais n'étaient pas suffisamment adaptées aux conditions socio-économiques du paysan. L'extrême pauvreté du paysan africain lui empêche toute possibilité d'investissements pour l'acquisition des intrants externes (engrais, semences améliorées, nouvelles technologies, pesticides etc.), ni de faire recours à la main d'œuvre salariée. L'aridité du climat et l'irrégularité des pluies, combinées aux propriétés des sols défavorables (textures légères, faibles capacités de rétention en eau et en éléments minéraux, faibles teneurs en matière organiques etc.) exigent de nombreuses précautions et innovations technologiques pour accompagner la fertilisation chimique. Aujourd'hui, la recherche agronomique a un rôle important à jouer pour aider à adapter l'utilisation des engrais minéraux aux conditions locales pour obtenir des rendements satisfaisants et une utilisation efficiente des engrais. Ce travail est une contribution à l'amélioration de la nutrition hydrique et minérale en conditions contraignantes du Sahel.

2.2. Amélioration des pratiques de la gestion de l'eau et de la fertilité du sol

La question de la perte de fertilité des sols cultivés et de leur restauration est cruciale en Afrique Subsaharienne et particulièrement aigüe au Niger, où les amendements organiques sont rares et le recours aux engrais chimiques inhibé par leur prix élevés. Le taux de croissance de la population nigérienne est à 3,3% l'an. Ceci a pour conséquence une occupation presque à 100% des terres agricoles, au détriment de la pratique de la jachère comme méthode de restauration de la fertilité. D'importants travaux scientifiques, en particuliers ceux de Piéri (1989) ont montré qu'une durée minimale de 10 ans était nécessaire pour une meilleure efficacité d'une jachère. Au vu du contexte nigérien, ce travail a consisté à trouver le moyen de raccourcir la durée de la jachère (2-3 ans), sans perdre son efficacité. Plusieurs modèles de "jachère améliorée", basés sur des techniques simples à mettre en oeuvre et sur la valorisation des résidus locaux, ont été évalués. Les résultats montrent que dans cette partie Ouest du Niger, la technique de Jachère qui consiste à abandonner le champ pour quelques années dites de repos, favorise le développement de l'encroustement de surface qui réduit considérablement l'infiltration des eaux de pluie et donc du cycle biogéochimique de la fertilité. L'intervention humaine, sous forme de Branchage ou paillage après un léger scarifiage améliore nettement l'infiltration et le retour de la fertilité. Ce travail a fait l'objet d'une publication : **DAOUDA OUSMANE S., MARINI P., J-M. K. AMBOUTA, I. BOUZOU (2000).** " Amélioration du régime hydrique des sols dégradés des Jachères de l'ouest nigérien (Aspects méthodologiques, premiers résultats). *Annales de l'Université Abdou Moumouni*, Tome VI, pp. 195-205, 2000

Amélioration du régime hydrique des sols dégradés des jachères de l'Ouest nigérien (Aspects méthodologiques, premiers résultats).

DAUDA OUSMANE S(1), MARINI P.(1) , JMK. AMBOUTA (2), I. BOUZOU (3),

(1) Département de Radio-Agronomie, Institut des Radio-Isotopes / Université Abdou Moumouni, BP 10 727 Niamey Niger.

(2) Département des Sciences du sol, Faculté d'Agronomie / Université Abdou Moumouni, Niamey, Niger.

(3) Département de Géographie, Faculté des Lettres et Sciences Humaines / Université Abdou Moumouni, Niamey, Niger.

(Accepté le 10/11/1997)

Résumé : L'infiltration des eaux de pluies a été suivie dans des terres du terroir de Bogodjotou, en jachère depuis 5 ans et en voie de dégradation dans la zone semi-aride du Niger. Plusieurs techniques susceptibles de modifier les états de surface afin d'améliorer les caractéristiques hydriques et hydrodynamiques du sol ont été expérimentées. Il s'agit de l'épandage de branches (B), du scarifiage (S), de l'association scarifiage et d'épandage de branches (SB), du zai (Z) et du paillage (P). Ces deux derniers traitements correspondent à une remise en culture de la jachère. Ces traitements sont comparés au témoin correspondant à la jachère sans intervention, nue (C) ou avec couvert de végétal (Cv).

Au terme de la première année d'observation, l'humidité du sol est passée de 10% sur les témoins à 13 à 18% sur les parcelles traitées. De même, les réserves en eau sur les premiers centimètres du sol ont augmentées de 14 à 43%, les fronts d'humectation atteignant 100 à 250 cm pour les parcelles traitées contre 40 cm pour les témoins. Les techniques de paillage et scarifiage branchage se sont avérées les plus intéressantes la première année suivant l'intervention. Le branchage seul n'a pas amélioré les caractéristiques hydriques et hydrodynamiques du sol.

Abstract : Infiltration rate for rainfall water has been measured in a field left in fallow for about 5 years at Bogodjotou 50 km Southwest of Niamey in Niger in a semi-arid zone. Five restoration technics (mulching (B), harrowing (S), mulching and harrowing (SB), strawing (P) and zai (Z)) were tested in order to see their effects on soil hydraulic and hydrodynamic characteristics, in comparison with a control bare (C) or vegetated (Cv) fallows. After the first year of experimentation, necessity of technics application were carried out. Positive effects on water infiltration and fertility restoration was observed. Sub soil moisture was 10% in C whereas it varied from 13% to 18% on the treated areas. Water downwards front was about 1,0 m to 2,5 m in the treated plots against 0,4 m for the control. Soil water stock was increased of 14% to 43% . Strawing and mulching-harrowing technics showed better effects on infiltration improvement and fertility restoration, one year after treatment.

Introduction

La jachère est considérée comme l'état d'un terrain laissé temporairement sans peuplement cultivé avec pour principal objectif la restauration de la fertilité des sols et la reconstitution de la savane. En Afrique de l'ouest, cet abandon cultural survient dès qu'une baisse de rendement se fait sentir. Le retour d'une savane arbustive ou arborée équilibrée s'obtient après une période pouvant aller jusqu'à 40 ans en zone aride et semi-aride (Floret, 1993). La plupart des études concernant la jachère en zone tropicale ont été réalisées en zone tropicale humide, très peu en zone tropicale sèche. Elles ont porté surtout sur les changements floristiques au cours du temps (Floret, 1993). En Afrique sahélienne, et notamment au Niger, la remontée biologique est souvent contrariée par la réduction du temps de jachère, la pression du pâturage, le prélèvement du bois des populations riveraines, usages qui entraînent des

évolutions des états de surface, dont le développement de l'encroûtement. Sur le terroir de *Bogodjotou*, environ 40% des superficies cultivables sont en jachère, la plupart depuis moins de 10 ans. La fréquence des loupes d'érosion et de ravines de ruissellement témoigne d'une dégradation avancée qui nécessite qu'une solution d'amélioration de gestion des terrains en jachère soit recherchée, vu qu'une durée de 10 ans de jachère soit minimale pour obtenir une amélioration mesurable des caractéristiques du sol (Charreau et Nicou, 1971 ; cités par Piéri, 1988 ; Roose, 1993). L'encroûtement superficiel progressif observé sur ces sols (Casenave et Valentin, 1989) participe à la réduction de l'infiltration et rend plus important le ruissellement. Les réserves en eau du sol diminuent pour ne plus être capables de soutenir une végétation abondante et variée, corollaire d'un retour de la fertilité dans l'agrosystème entier. Le but de ce travail est de déterminer la répartition des eaux de pluies à la surface du sol, après 5 ans de jachère; de trouver des moyens simples pouvant permettre d'intervenir en faveur de l'infiltration et la reconstitution des réserves en eau du sol utilisable par la végétation. Plusieurs méthodes de régénération et de récupération des sols dégradés ont été expérimentées. Cet article présente la méthodologie et les tendances observées la première année de l'intervention.

Matériel et méthodes

Le terroir de *Bogodjotou* est situé en zone nord-soudanienne, à 50 km au Sud de Niamey au Niger. Le climat est de type sahélo-soudanien avec une pluviométrie annuelle de l'ordre de 700 mm. Le sol est du type ferrugineux tropical épais de texture sableuse à sablo-limoneuse. C'est un terroir dominé par des plateaux cuirassés impropres à la culture. Les terres cultivables concentrées dans les bas fonds et sur glacis sont soumises à une forte pression entraînant une dégradation rapide. Dans ce terroir, la jachère occupe environ 40% des superficies dont plus de la moitié se trouvent en état de dégradation avancée (érosion au stade de ravinement). Le terrain d'essai d'un demi hectare a été choisi de façon représentative au milieu du terroir. Il alterne typiquement des zones boisées à herbacées avec des plages nues de 0,1 à 0,2 % de pente moyenne. Cinq traitements d'amélioration du régime hydrique sont appliqués à la surface du sol : le Scarifiage (S), l'épandage de Branchages (B), le Scarifiage associé à l'épandage de Branchages (SB), le Paillage (P) et le Zaï (Z). La jachère naturelle non perturbée et nue (C) ou avec revêtement de végétation (Cv) sont les témoins. **Le scarifiage** consiste à un léger labour manuel effectué à la daba, **l'épandage de branchages** à l'apport en surface de l'équivalent de 30 Tha^{-1} sous forme de résidus animaux et végétaux disponibles sur place, résidus de l'abattage et branches mortes de *Guiera senegalensis*. **Le paillage** correspond à l'apport de l'équivalent de 17,6 Tha^{-1} de paille de mil, **le zaï** en des trous de 40 cm de diamètre et 20 cm de profondeur recevant du fumier et dont la terre extraite est disposée en bourrelet en aval ; les trous sont espacés de 80 cm et disposés en quinconce. La quantité de fumier équivaut à un apport de 2,8 Tha^{-1} . Des cultures de mil sont réalisées sur le paillage et le zaï, ce qui devraient permettre de voir l'évolution des caractères hydriques et hydrodynamiques après remise en culture d'une jachère de courte durée. Les parcelles expérimentales d'une surface élémentaire de 75 m^2 sont délimitées par une feuille de tôle de 15 cm de haut, enfoncée de 5 cm dans le sol. Les répétitions sont au nombre de deux, limitées par la surface nue disponible. Les autres traitements ont une surface élémentaire de 25 m^2 et sont répétées 3 fois. Chaque parcelle est protégée en amont et en aval par des rigoles d'évacuation du ruissellement.

Sur chaque parcelle est installé un tube d'accès pour sonde en PVC de 2,5 m. Le suivi de l'humidité du sol est hebdomadaire. L'évolution de l'humidité est suivie par humidimétrie neutronique.

Un étalonnage neutronique du sol a été préalablement effectué sur la parcelle. Il consiste à définir la pente et l'ordonnée à l'origine de la droite qui lie N à H_v . Les couples (comptages, humidités) sont obtenus à proximité du champ, mesurés simultanément au cours du dessèchement d'un profil préalablement porté à la capacité au champ par un arrosage abondant. C'est à partir de ces coefficients d'étalonnage que les taux de comptages neutroniques seront ultérieurement convertis en humidités volumiques et en stocks d'eau du sol après chaque série de mesure. Les résultats obtenus pour le site expérimental de Bogodjotou sont présentés en figure 1. La pente est de $37,5 \cdot 10^{-3}$ et le terme constant égal à -8 . Les humidités prises en compte pendant l'étalonnage varient de 7% à 28%. Un complément de mesures avec des humidités plus faibles souvent rencontrées dans les horizons de surface où elles peuvent descendre en dessous de 3% est en cours.

Résultats et discussions

La pluviosité

En 1996 la pluviométrie a été caractérisée par un cumul de 491,5 mm sur 32 jours de pluies (figure 2). Les pluies ont été plus irrégulières en début de saison (mai-juin) qu'en milieu de saison (juillet-août), situation classique en milieu sahélien avec de fortes probabilités de sécheresse en début de cycle, juste après la germination des végétaux et au moment où leur système racinaire n'est pas encore suffisamment développé. Ceci justifie la nécessité de l'infiltration et la conservation des premières pluies dans le sol à l'usage des végétaux pour leur croissance juvénile. Les pluies très rapprochées en milieu de saison (12 en août) créent les conditions de ruissellement maximum (Lamachère 1991, Casenave et Valentin, 1989 et 1992), nécessitant également une intervention.

L'humidité du sol

L'humidité du sol a été suivie du début de la saison des pluies 96 jusqu'à la fin de la saison sèche début de saison des pluies 97. Les mesures ont été effectuées sur l'ensemble des essais, à un rythme hebdomadaire. Sur chaque tube, les profils ont été relevés tous les 10 cm entre 20 cm et 250 cm de profondeur. Les figures 3A et 3B représentent les valeurs obtenues à 20 cm. Cette profondeur est celle de la germination des semences, mais aussi celle utilisée pour la nutrition hydrique et minérale de la culture du mil dans les cas du paillage et du zaf. Le sol est relativement humide pendant la saison des pluies (juillet à septembre) et se dessèche très rapidement en surface à partir du mois d'octobre.

Dans la jachère nue sans traitement, le niveau de l'humidité à 20 cm reste faible (<10%) jusqu'au mi-août après 376,5 mm de cumul pluviométrique. La situation est identique sur la jachère avec revêtement de végétation. Le simple branchage n'a pas non plus modifié cette situation. Au contraire, l'humidité a atteint 13 et 18% dès le mois de juillet sur les traitements S et SB respectivement, ce qui témoigne d'une bonne infiltration favorisée par ces deux techniques à l'occasion des premières pluies. Pour ces sols l'humidité à la capacité au champ, mesurée 72 heures après saturation du profil (Jordan, 1983 ; Daouda et al., 1991, Daouda, 1996) est de l'ordre de 20% dont seulement la moitié est utilisable par les végétaux (Duthil, 1971). Le niveau de 10% représente donc la limite inférieure de l'humidité nécessaire à la germination et la croissance des végétaux, ce qui peut expliquer en partie le blocage du retour de la végétation dans une jachère ordinaire de l'ouest nigérien et sa dégradation progressive. Scarifiage et Scarifiage associé à l'épandage de branchages donnent des effets positifs en première année d'expérimentation. L'inefficacité de l'épandage de branchages seul

montre que le retour au sol d'une fraction de la végétation produite n'est pas suffisant pour améliorer le régime hydrique favorable à la restauration de la fertilité au stade actuel de ces jachères ouest nigériennes. Dans le sol cultivé, le taux d'humidité est également supérieur à 13% depuis la fin juin et augmente faiblement mais régulièrement jusqu'à la troisième décennie de septembre (figure 3B). Il est régulièrement plus élevé sur paillage que sur le zaï. Ces deux techniques contribuent à maintenir en surface des conditions d'humidité plus favorables pour la germination et la croissance des végétaux.

Infiltration de l'eau dans le sol

L'évolution des profils hydriques est présentée sur les figures 4 à 10. Globalement, ils montrent des couches superficielles très sèches en fin de saison sèche (début mai). Outre le paillage (figure 9), le taux d'humidité est inférieur à 10% sur le premier mètre du sol. Les couches profondes restent assez humides presque toute l'année ($H_v > 12\%$), ce qui explique le maintien d'une végétation arborée et arbustive sur la jachère. Après un cumul de 491,5 mm, le front d'humectation n'est pas allé au-delà de 0,5 mètre dans la jachère nue ou avec revêtement herbacé ou même sur la jachère avec épandage de branchages (figures 4, 5 et 8). L'infiltration de l'eau dans le sol est très faible. La végétation, autant que le paillage et le branchage, devrait protéger le sol contre l'énergie des gouttes de pluie surtout durant les mois les plus agressifs (Juillet, Août) où la fréquence des pluies, le taux d'humidité du sol, la hauteur et l'intensité des pluies peuvent se conjuguer pour aboutir à un ruissellement maximal (Roose, 1979). Mais l'efficacité de la protection du sol par la végétation dépend du type de végétation, de sa structure, de sa pérennité. La végétation couvrante et permanente (forêt, prairie ou jachère naturelle) protège mieux. Le couvert végétal du traitement Cv est une végétation herbacée très éparse qui protège très peu le sol.

Dans les parcelles S et SB, l'eau est descendue jusqu'à 2 mètres (figures 6 et 7). Le scarifiage, en cassant la pellicule de battance, augmente la macroporosité, la rugosité et la surface d'infiltration du sol. Le rôle du branchage est de couvrir le sol durant les fortes pluies afin d'éviter la destruction de la structure de l'horizon superficiel qui conduirait à une baisse de l'infiltrabilité. Lamachère (1991) montre que les facteurs pédologiques explicatifs de l'infiltration évoluent après le scarifiage, en fonction de la quantité des pluies tombées. Le scarifiage ne joue plus aucun rôle après 200 mm de cumul pluviométrique, l'action des gouttes de pluie sur le sol entraînant une forte diminution de l'infiltration et un rendement maximal du ruissellement (Roose, 1973). Le scarifiage augmente la détachabilité et donc à long terme le risque d'érosion (Roose, 1977).

Le paillage a entraîné une infiltration jusqu'à 2,50 mètres, la dernière profondeur de mesure (figure 9), et seulement à 1 mètre dans le cas du zaï. Ce résultat a été obtenu par Hoogmoed et al. (1991), sur des micropLOTS de 2,25 m², sur sol sableux. Pour des pluies de 10 à 100 mm ils obtiennent plus de 98% d'infiltration sur sols cultivés, 80% sur sol nu encroûté et seulement 70% sur jachère tigrée de végétation et de croûtes d'érosion.

Evolution de la réserve en eau du sol

Les stocks hydriques sont présentés en figures 11A pour les jachères et figure 11B pour les jachères mises en culture. Les traitements SB et S se distinguent nettement des jachères non traitées. Les valeurs des stocks sur 250 cm ont comparées le 23 Août 97; 389 mm pour SB, 346 mm pour S contre 304 mm et 266 mm pour C et B respectivement

(Tableau 1). La différence par rapport au C est très significative pour le SB (avec une probabilité $<0,01$).

Dans les parties cultivées de la jachère, le paillage se montre nettement au-dessus des autres traitements. Les stocks obtenus au 23 Août 97 sont de 433 mm et 365 mm et très significativement différents du stock des témoins (probabilité $<0,005$). Roose (1977) montre qu'avec un paillage de 4 à 6 t ha⁻¹ on réduit le ruissellement à 0,5% en faveur de l'infiltration.

Les deux techniques, paillage et zaï procèdent d'un apport de matière organique au sol pour stimuler l'activité biologique de la mésofaune. Les galeries ainsi créées par ces microorganismes améliorent l'infiltration de l'eau dans le sol. Nos résultats indiquent une meilleure efficacité avec le paillage, la première année de l'application des techniques. L'apport de matière organique est plus important sur le Paillage (17,6 Tha⁻¹) que sur le Zaï (2,8). La paille de mil est répartie sur l'ensemble de la surface pour le premier, mais seulement sur 20% de la surface sur le deuxième. Dans des conditions similaires au Burkina, Roose (1996) obtient une meilleure infiltration avec le Zaï, mais la simple cuvette sans matière organique n'a pas entraîné de changement significatifs sur les rendements en paille et en grains de sorgho.

Conclusion

Le développement agricole en zone sahélienne doit prendre en compte un grand nombre de problèmes parmi lesquels la gestion et la conservation des eaux des pluies. Le développement des techniques permettant l'augmentation de l'infiltration et la réduction du ruissellement s'inscrit dans ce cadre. On a longtemps cru que la mise en jachère pour ne pas dire l'abandon des terres peu productives permettait dans tous les cas un retour progressif de la fertilité avec l'âge de la jachère. Ce travail vient de montrer que ce n'est pas toujours le cas. Le suivi des profils hydriques du sol montre que dans ce type de jachère, l'évolution des états de surface oriente vers un déséquilibre de la répartition de l'eau à la surface du sol. L'infiltration des eaux de pluie sur la jachère naturelle est très fortement réduite (pénétration de l'eau à 40 cm seulement en fin de saison des pluies). La reconstitution des réserves en eau du sol, nécessaire au retour rapide de la productivité et de la fertilité également bloquée. D'un autre côté, le ruissellement et le risque d'érosion hydrique se trouvent accrus. Le faible manteau de terre, en même temps que les semences végétales peuvent alors être entraînés vers l'aval, laissant en amont des plages d'érosion de plus en plus larges. La germination et la croissance des végétaux sont alors bloquées, faisant évoluer paradoxalement la jachère vers une dégradation toujours plus poussée.

L'épandage de branchages sur jachère naturelle n'a entraîné aucun effet significatif sur le régime hydrique, la première année après le traitement. Le fait de briser par un léger scarifiage la croûte superficielle a augmenté la pénétration de l'eau dans le sol, d'autant plus importante qu'il est associé à un apport de matière organique sous forme de branchages. Mais le meilleur résultat sur l'infiltration est obtenu sur la jachère mise en culture, avec l'épandage de la paille de mil à la surface du sol.

Ce résultat justifie l'obligation d'une intervention pour arrêter l'évolution vers la dégradation irréversible de ces terres. Pour ces types de jachères, la mise en culture en appliquant les techniques du paillage ou du zaï est préférable à l'abandon sous forme de jachère pour l'instauration d'un régime hydrique favorable à l'infiltration et à la reconstitution des réserves en eau du sol, nécessaire à la restauration et au maintien de la fertilité des terres.

Tableau 1 : Stocks hydriques du sol à la fin des mois les plus pluvieux.

	Stocks hydriques le 23/08/97 en mm sur 2,5 m	Signification par rapport au contrôle (p=probabilité d'égalité des moyennes
Contrôle (sans intervention)	304±19	
Scarifiage	364±40	NS (p=0,179)
Branchage	266±2	S (p=0,025)
Scarifiage - branchage	389±26	S (p=0,009)
Paillage	433±97	S (p=0,003)
Zai	365±1	S (p=0,005)
Contrôle avec revêtement de végétation	317±69	NS (p=0,693)

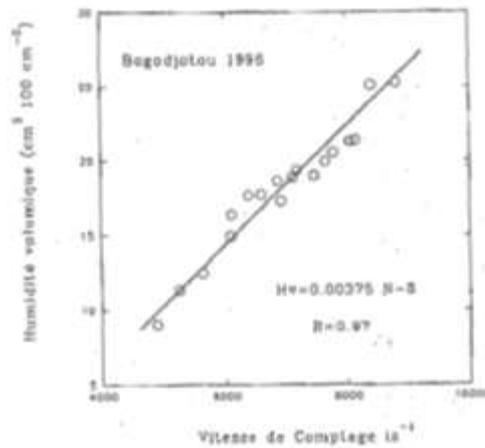


Figure 1 : Relation entre la vitesse de comptage N en impulsions par seconde et l'humidité volumique Hv en cm³ d'eau pour 100 cm³ de sol.

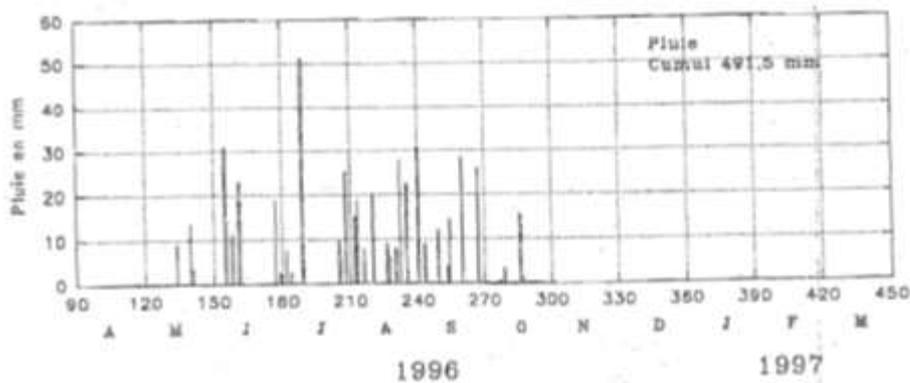


Figure 2 : Pluviométrie pour l'année 1996 à Bogodjotou à 70 km au Sud Est de Niamey au Niger.

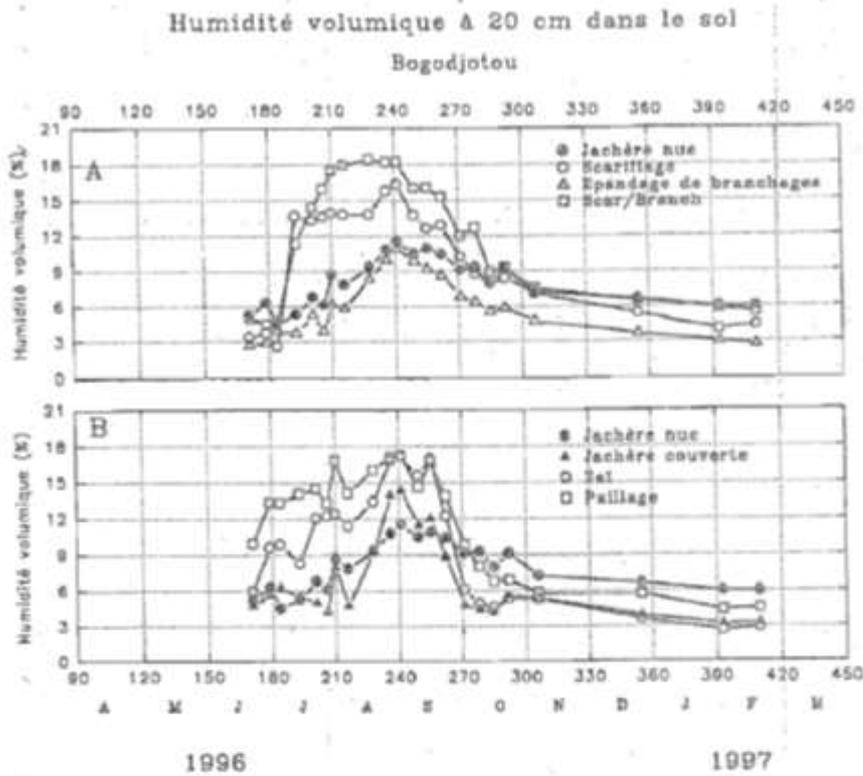


Figure 3 : Evolution de l'humidité à 20 cm du sol d'une jachère ayant reçu diverses techniques de restauration de la fertilité (A) et la première année de la remise en culture selon les techniques de paillage et de zaf (B). Les traitements sont comparés à la jachère sans intervention, nu ou avec revêtement de végétation.

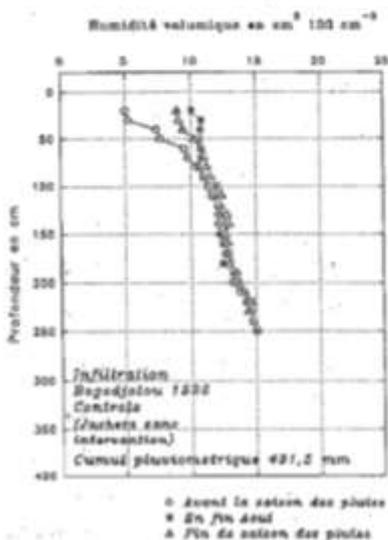


Figure 4 : Profil d'humectation du sol sous la jachère nue en 1996.

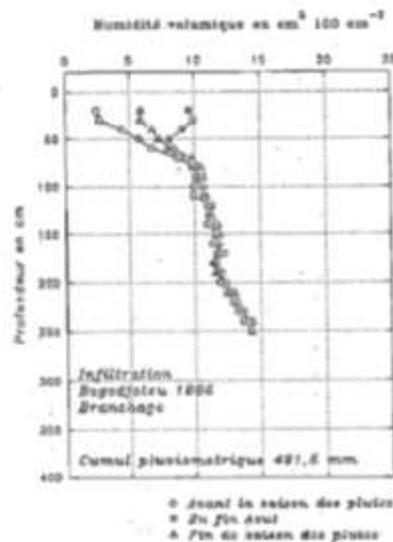


Figure 5 : Profil d'humectation du sol sous la jachère nue avec branchage en 1996.

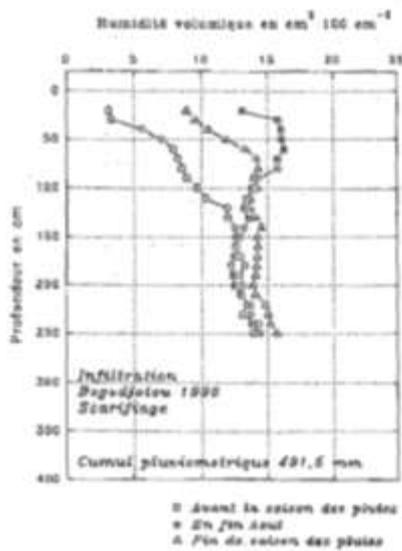


Figure 6 : Profil d'humectation du sol sous la jachère scarifiée en 1996.

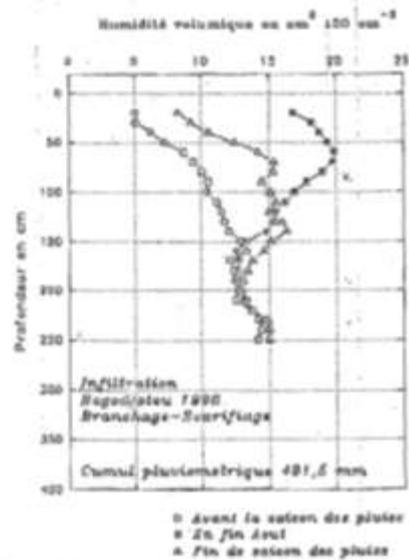


Figure 7 : Profil d'humectation du sol sous la jachère ayant reçu le traitement de scarifiage et d'épandage de branchages en 1996.

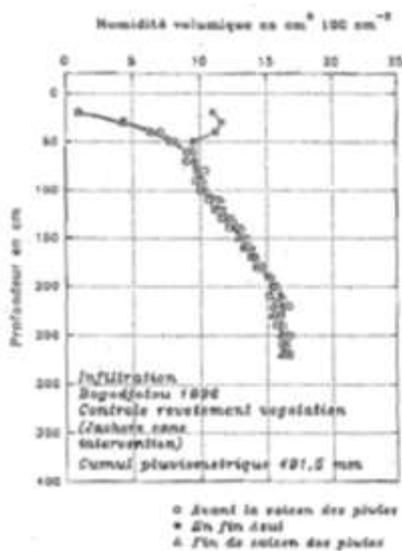


Figure 8 : Profil d'humectation du sol sous la jachère avec couvert de végétal en 1996

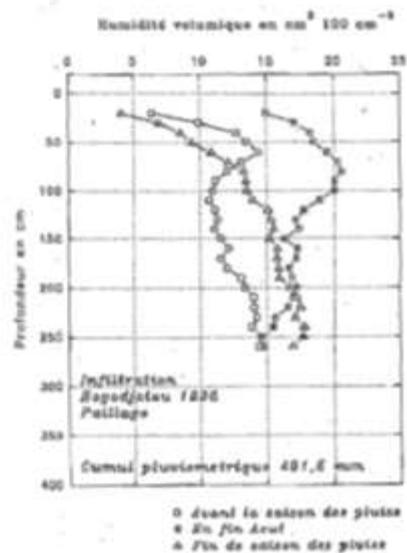


Figure 9 : Profil d'humectation dans un sol de jachère en première année de remise en culture selon la technique du paillage en 1996

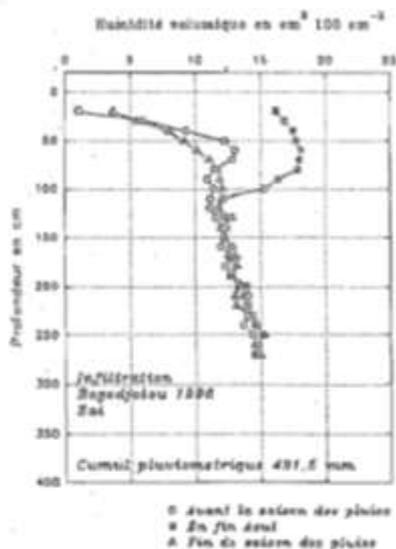


Figure 10 : Profil d'humectation dans un sol de jachère en première année de remise en culture selon la technique du zaï en 1996

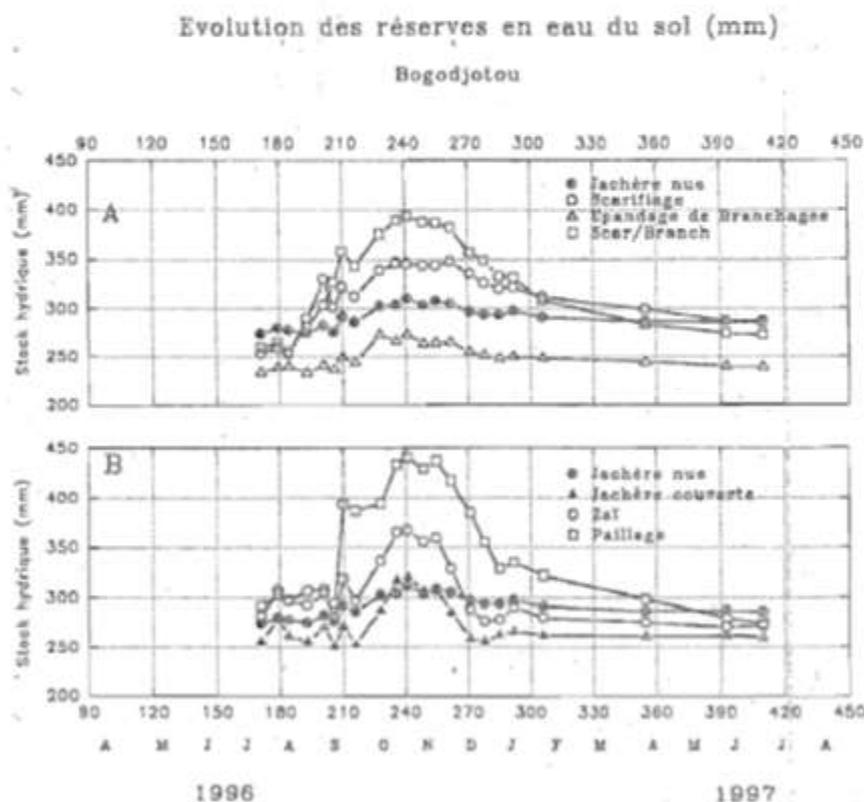


Figure 11 : Evolution de la réserve en eau du sol d'une jachère ayant reçue diverses techniques d'amélioration de l'infiltration (A) et la première année de la remise en culture selon les techniques de paillage et de zaï (B). Les traitements sont comparés à la jachère sans intervention, nu ou avec revêtement de végétation.

Remerciements

Cet travail a été réalisé grâce à l'appui financier du Fonds Européen de Développement (FED) à travers le projet 7 ACP RPR 269 REG/711. Vive la coopération entre le Niger et l'Europe.

Références bibliographiques

- Casenave, A. et Valentin, C., 1989.** Schéma général des régimes pluviométriques en Afrique subtropicale et intertropicale. Dans: *Les états de surface de la zone sahélienne*. Influence sur l'infiltration. A. Casenave et C. Valentin (Eds.). Institut français de recherche scientifique pour le développement en coopération (ORSTOM), 1989, pp 35-41.
- Casenave, A. et Valentin, C., 1992.** A runoff capability classification system based on surface features criteria in semi-arid areas of West Africa. *Journal of Hydrology*, 130 (1992) 231-249.
- Charreau C. et Nicou R. (1971).** L'amélioration du profil cultural dans les sols sableux et sableux-argileux de la zone tropicale sèche ouest africaine et ses incidences agronomiques. Dans : *Bulletin Agronomique 23, Agronomie Tropicale*.
- Daouda Ousmane, S., Sicot, M., et Marini, P. , 1991.** Caractérisation de la diversité hydrodynamique d'un sol ferrugineux tropical, différencié sur sable dunaire en milieu soudano-sahélien.. In : *Soil Water Balance in the Soudano-sahélien Zone*, Sivakumar, S.V.K., Wallace, J.S., Renard, C. et Giroux, C. (eds), 1991. Proceeding of the Niamey Workshop, Niamey, Niger, february 1991), n°199 : 209-216.
- Daouda Ousmane S. (1996).** Comportement hydrique de cultivars de mil (*Pennisetum typhoides*) en condition pédoclimatiques contraignantes : réactions de la plante entière à un stress hydrique post-floral. Thèse de Doctorat. Ecole Nationale Supérieure Agronomique de Rennes, septembre 1996. 230 p.
- Duthil J. (1971).** Eléments d'écologie et d'agronomie. T1 : connaissance du milieu. Collection des ingénieurs et techniques agricoles. 385 p.
- Floret C. ; Pontanier R. (1993).** Recherche sur la jachère en Afrique tropicale. Dans : Floret C. ; Pontanier R et Serpentini G. (Eds) *La Jachère en Afrique Tropicale*. 11-46. Dossier MAB, n°16. UNESCO 1993.
- Hoogmoed W. B., Klaij M. C. and Brouwer J. (1991)** . Infiltration, runoff and drainage in the Sudano Sahelian zone. In : *Soil Water Balance in the Soudano-sahélien Zone*, Sivakumar, S.V.K., Wallace, J.S., Renard, C. et Giroux, C. (eds), 1991. Proceeding of the Niamey Workshop, Niamey, Niger, february 1991), n°199 : 85-98.
- Jordan O. (1983).** Contribution à l'étude de la capacité de rétention en eau des sols : Cas de deux sols malgaches. Thèse de Doctorat Ingénieur. Ecole Nationale Supérieure Agronomique de Montpellier, Académie de Montpellier, Université des Sciences et techniques du Languedoc. Janvier 1983. 145 p

- Lamachère J. M. (1991).** Aptitude au ruissellement et à l'infiltration d'un sol sableux fin après sarclage. In : *Soil Water Balance in the Soudano-sahélien Zone*, Sivakumar, S.V.K., Wallace, J.S., Renard, C. et Giroux, C. (eds), 1991. Proceeding of the Niamey Workshop, Niamey, Niger, february 1991), n°199 : 109-119.
- Piéri C. (1989).** Fertilité des terres de savanes. Bilan de trente ans de recherche et de développement agricoles au sud du Sahara. CIRAD-IRAT Paris. 445p.
- Roose E. J. (1973).** Dix-sept années de mesures expérimentales de l'érosion et du ruissellement sur un sol ferrallitique sableux de la Côte d'Ivoire. Contribution à l'étude de l'érosion hydrique en milieu intertropical. Thèse de Doct. Ing., Fac Sc. Abidjan, 1973, n°20.
- Roose E. J. (1977).** Erosion et ruissellement en Afrique de l'ouest. Vingt années de mesures en petites parcelles expérimentales. Travaux et Documents de l'ORSTOM. Ed. ORSTOM, Paris 1977, n°78.
- Roose E. J., (1979).** Dynamique actuelle d'un sol ferrallitique gravillonnaire issu de granite sous culture et sous une savane soudanienne du nord de la Côte d'Ivoire. *Cah. ORSTOM, Série Pédologie* 17 (2) 81 :118.
- Roose E. J., (1993).** « Capacité des jachères à restaurer la fertilité des sols pauvres en zones soudano-sahélienne ». In : *La jachère en Afrique de l'Ouest*, Paris, ORSTOM, Coll. Colloques et Séminaires : 233-244.
- Roose E. J., (1996).** Fonctionnement, limites et amélioration d'une pratique traditionnelle africaine de réhabilitation de la végétation et de la productivité des terres dégradées en région soudano-sahélienne (Burkina Faso). *Cah. ORSTOM, Sé. Pédol., Vol. XXVIII, n°2, 1996 : 159-173.*

2.3. Développement d'une méthode d'évaluation de la recharge en eau de la nappe phréatique par les eaux de pluies ou d'irrigation

La conversion de l'utilisation des terres de cultures pluviales à la culture irriguée augmente le drainage et la recharge des nappes, mais des estimations fiables de l'ampleur du changement sont difficiles à obtenir pour les aquifères peu profonds. Dans la vallée de la Komadougou Yobe (bassin du lac Tchad, Sud Est du Niger), la zone de culture irriguée a doublé au cours des trois dernières décennies, ce qui peut avoir une augmentation des flux de la nappe phréatique. La connaissance de ces flux permettra également de quantifier les substances en solution et éventuellement prévenir les risques de pollution de ces nappes en particulier par les nitrates agricoles.

Pour quantifier l'augmentation de la recharge, le débit d'eau dans la zone non saturée a été modélisé, en tenant compte de l'hétérogénéité pédologique. Pour chaque unité sédimentaire, l'humidité du sol a été suivie in situ grâce à la sonde à neutrons. Une méthode de simulations numériques monodimensionnelle verticale (procédure de Monte-Carlo), utilisant les fonctions de densité de probabilité ont permis de reproduire les mesures d'humidité. La méthode a ensuite été validée sur différentes classes texturales et avec un modèle en trois dimensions. La recharge des eaux souterraines a été simulée séparément dans des conditions irriguées et pluviales. Les principaux résultats de cette étude peuvent être résumés comme suit:

1. Une estimation précise de l'augmentation des eaux souterraines de recharge à travers la zone vadose peu profonde est améliorée par une identification fiable des paramètres hydrauliques des sols qui régissent à la fois la capacité de rétention en eau et la conductivité hydraulique.
2. Dans cette région semi-aride, les états de surfaces du sol jouent un rôle déterminant dans la simulation des processus d'évapotranspiration et sont les sources les plus critiques de l'incertitude dans l'estimation de la recharge.
3. Dans la vallée de la Komadougou Yobe, en dépit des incertitudes élevées dans la simulation de la recharge dans les deux conditions de culture pluviale et irriguée, la recharge différentielle pourrait bien être évaluée, à environ 15 cm en une année sèche et 25 cm en année humide.
4. L'augmentation de la recharge en eaux souterraines pour la vallée de la Komadougou Yobe correspond à 18 à 23% des précipitations ou de l'irrigation et est compatible avec les études précédentes à l'échelle mondiale. La méthode pour estimer les changements dans les flux décrits ici peut être utilisée dans d'autres régions semi-arides. Il est particulièrement adapté

pour les aquifères peu profonds avec des flux relativement rapides dans la zone vadose qui empêchent l'utilisation de traceurs conservateurs (par exemple chlorure) aux estimations des changements dans les flux d'eau en réponse à des changements dans l'utilisation des terres.

Ce travail a été publié dans Modeling Increased Groundwater Recharge due to Change from Rainfed to Irrigated Cropping in Semiarid Region; *Vadose Zone J.*, 2013:12, Issue 2; DOI:10.2136/vzj2012.0148 . **Le Coz M., Favreau G. and Daouda Ousmane S. (2013).**

Mathieu Le Coz*
Guillaume Favreau
Sani Daouda Ousmane

This paper deals with the application of a two-step method for quantifying changes in groundwater recharge due to an increase in irrigated areas in semiarid regions. This method was applied in the Komadugu Yobe River valley (southeastern Niger, Lake Chad Basin) and showed that irrigation development could result in a significant increase in recharge.

Mathieu Le Coz, Univ. Montpellier 2, IRD, CNRS, UMI, UMR 5369 HydroSciences Montpellier, Place Eugène Bataillon, cc MSE, 34095 Montpellier Cedex 5, France and Univ. de Poitiers, ICZMP/Hydrasa, rue Albert Turpin, 86022 Poitiers, France; Guillaume Favreau, Univ. Montpellier 2, IRD, CNRS, UMI, UMR 5369 HydroSciences Montpellier, Place Eugène Bataillon, cc MSE, 34095 Montpellier Cedex 5, France; Sani Daouda Ousmane, Univ. Abdou Moumouni, Institut des Radioisotopes, Département de Radioagronomie, BP 10727, Niamey, Niger. *Corresponding author (mathieu.lecoz@univ-poitiers.fr).

Vadose Zone J.
doi:10.2136/vzj2012.0148
Received 3 Oct. 2012.

© Soil Science Society of America
5585 Guilford Rd., Madison, WI 53711 USA.
All rights reserved. No part of this periodical may be reproduced or transmitted in any form or by any means, electronic or mechanical, including photocopying, recording, or any information storage and retrieval system, without permission in writing from the publisher.

Modeling Increased Groundwater Recharge due to Change from Rainfed to Irrigated Cropping in a Semiarid Region

Land use conversion from rainfed to irrigated cropping increases drainage and groundwater recharge, yet reliable estimates of the magnitude of the change are difficult to obtain for shallow aquifers. In the semiarid Komadugu Yobe River valley (Lake Chad basin, SE Niger), the area of irrigated cropping has doubled in the last three decades, which may have increased recharge fluxes to the shallow (~6 m in depth) water table. To quantify the increase in recharge, water flow in the vadose zone was modeled, taking into account the predetermined heterogeneity of the River alluvium. For each sedimentary unit, soil moisture was monitored in situ under controlled hydraulic surface conditions by vertical neutron probe surveys. Using one-dimensional numerical simulations in a Monte-Carlo procedure, probability density functions (PDFs) of soil hydraulic parameters that reproduce moisture measurements were established. The centers of the PDFs were shown to be in accordance with the textural classification inferred from grain size analyses. The PDFs were then combined with a three-dimensional geological model of the alluvium and the groundwater recharge was simulated separately under irrigated and rainfed cropping conditions. The results showed that the uncertainty in soil hydraulic parameters (i) strongly influenced the absolute values of the simulated recharge, but (ii) only slightly affected the simulated differential recharge between irrigated and rainfed cropping conditions. The increase in groundwater recharge was therefore well constrained and was estimated at 15 cm (dry year) and 25 cm (wet year), i.e., representing 18 and 23% of water input. The approach described here is applicable to most shallow aquifers in River valleys where surface water is used for irrigation, a widespread characteristic of semiarid regions.

Abbreviations: PDF, probability density functions; PTF, pedotransfer function.

In most semiarid regions, crop production was increased thanks to a dramatic expansion of irrigated land (Siebert et al., 2005). Where irrigation uses aquifer resources with relatively low renewal rates, the development of irrigation has resulted in long-term aquifer depletion (Siebert et al., 2010; Kim and Jackson, 2012). Conversely, where irrigation uses surface water, e.g., in large River valleys, drainage and net groundwater recharge may have increased (Kurtzman and Scanlon, 2011; Doll et al., 2012). Most estimates of changes in drainage and recharge rates were obtained for aquifers with relatively thick vadose zones, i.e., with relatively long-term transit times (Scanlon et al., 2006, 2007); as a consequence, the magnitude of the change in recharge for shallow aquifers with little or no year-to-year storage in the vadose zone remains poorly documented.

Process-based numerical models of the vadose zone are powerful tools to estimate the sensitivity of water fluxes under different soil surface and climate conditions (e.g., Jimenez-Martinez et al., 2009; Ficklin et al., 2010). Such models are generally based on Richards' equation, which describes water movements in unsaturated porous media, and require soil hydraulic functions, i.e., both water retention and hydraulic conductivity curves, usually defined by analytical expressions that depend on soil hydraulic parameters. As estimating hydraulic parameters for natural soils is complex, several independent methods have been developed. Because of nonlinearity and hysteresis in processes, direct measurements based on precise analysis of water fluxes on soil samples are difficult and are subject to considerable experimental limitations (Schaap et al., 2004). Moreover, due to the strong spatial variability of soil characteristics, this approach requires a large number of data to representatively describe the hydraulic properties of a given area, which can be both time-consuming and costly to collect (Wosten et al., 2001). As a result, many investigations were undertaken to estimate soil hydraulic parameters using empirical relationships

deduced from more readily available soil data, such as soil texture and bulk density (e.g., Wosten et al., 1999; Nemes et al., 2001; Schaap et al., 2001; Saxton and Rawls, 2006). These relationships, commonly referred as pedotransfer functions (PTFs), are mostly based on regression analysis of an existing soil database. In spite of the popular use of this predictive methodology, PTFs are often not sufficiently accurate to evaluate groundwater recharge at site scale (Wang et al., 2009).

Inverse modeling is an alternative way of estimating site-specific soil hydraulic parameters under more flexible conditions than those typically used in laboratory experiments (Vrugt et al., 2008). This consists in obtaining a set of parameters that yields the best fit with the observed response of the system with respect to certain goodness-of-fit criteria. The most recent optimization algorithms were shown to be able to deal with the main limitations of the approach—in particular uncertainties associated with inversely estimated parameters (e.g., Vrugt et al., 2008) and equifinality issues (e.g., Mertens et al., 2004). One major weakness of optimization methods remains the treatment of input data errors during the inversion procedure, which can result in uncertainty bounds that do not consistently bracket the actual system behavior (Vrugt et al., 2004).

This study focuses on the downstream valley of the Komadugu Yobe River, one of the main recharge areas of the unconfined Lake Chad Quaternary aquifer (Leduc et al., 1998; Leblanc, 2002). Since the early 1980s, the development of cash crops (e.g., sweet pepper) has doubled the amount of irrigated land in the River valley (Pret and Konate, 2005). A process-based modeling of water flow through the vadose zone (0–5 m) was designed to quantify the resulting increase in groundwater recharge. The first step of the two-step procedure is described in previous works of Le Coz (2010) and Le Coz et al. (2011). Briefly, it consisted in characterizing the spatial arrangement of the sedimentary bodies that make up the

Komadugu Yobe River alluvium. A dense network of boreholes drilled in the vadose zone of the irrigated cropping area revealed alternating layers of sand and clayey sand overlaid with a ~1-m thick silty sand layer (Le Coz, 2010). Such heterogeneities were interpreted as the result of frequent migrations of the River channel, as depicted on the soil surface by remote sensing data (Le Coz et al., 2011). These data were therefore used to train multiple-point statistics, and by adding bore log information, a three-dimensional geological model was generated (Le Coz et al., 2011).

The second step of the procedure is the main topic of this paper. We describe the inference of the soil hydraulic parameters for each of the three sedimentary facies of the geological model; an inverse modeling approach based on a Monte-Carlo parameter exploration was used to account for input data errors. Next we describe how the resulting probability density functions and the three-dimensional geological model were combined and used to estimate groundwater recharge under both irrigated and rainfed cropping systems. The final section is a general discussion of the estimated change in recharge following conversion from rainfed to irrigated cropping in a typical shallow aquifer in a semiarid region.

Inferring Soil Hydraulic Parameters

Available Data

The study site is located in the Komadugu Yobe River valley, south of the small town of Diffa, in southeastern Niger (Fig. 1). The site is in an intensive cropping area, in which a relatively dense array of hydrological surveys has been conducted from the 1990s to the present. The level of the water table is mainly influenced by indirect recharge from the seasonal flow of the Komadugu Yobe River; the water table depth varies from 3 to 4.5 m close to the River, depending on the magnitude of the River discharge; the depth to the water

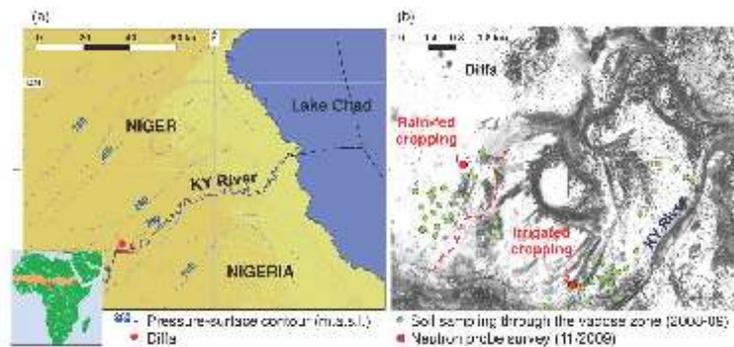


Fig. 1. (a) The downstream part of the Komadugu Yobe River valley and the northern pool of Lake Chad, in the middle of the Sahelian belt and (b) aerial photograph (IGNN, 01/1975) of the study area between the town of Diffa and the Komadugu Yobe River.

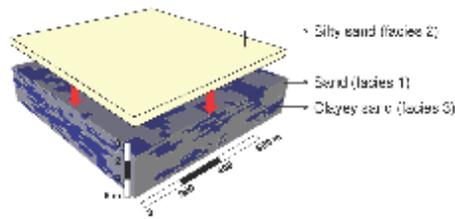


Fig. 2. An example of realization of the three-dimensional geological model: alternating sand and clayey sand layers overlaid with a ~1-m-thick silty sand layer.

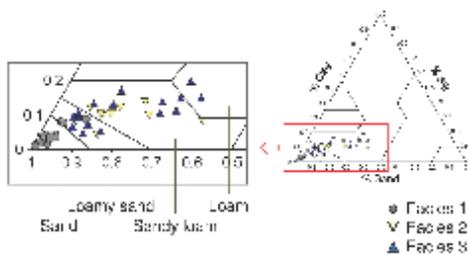


Fig. 3. Soil textural triangle with 50 soil samples taken in the vadose zone of the Komadugu Yobe River valley; facies 1 corresponds to the sand/loamy sand USDA classes; both facies 2 and 3 correspond to the sandy loam/loamy sand/loam USDA classes.

table increases with a mean gradient of 0.2‰ and is ~7 m in depth in the vicinity of the valley boundary (Fig. 1). Groundwater withdrawals are low and irrigation mainly uses River surface water (Leduc et al., 1998). As a result, today, irrigated cropping is preferentially located along the River, whereas rainfed cropping is usually practiced at a distance of more than 1 km from the thalweg (Fig. 1b). This can also be explained by the fact that the silty sand top soil layer, which is well suited for the most profitable cash crop, is limited to the inner part of the valley (SOGHETA, 1962).

Figure 2 shows the vadose zone as described by a three-dimensional geological model. The three sedimentary facies of the model, i.e., sand (facies 1), silty sand (facies 2), and clayey sand (facies 3), were first geologically distinguished by field studies (estimated texture, color, thickness; Le Coz, 2010). Textural analyses of 50 samples (Fig. 1b) were subsequently performed in the laboratory, enabling the sedimentary facies to be classified in the USDA soil texture classes (Fig. 3): facies 1 corresponded to the sand/loamy sand soil classes; both facies 2 and 3 corresponded to the sandy loam/loamy sand/loam soil classes.

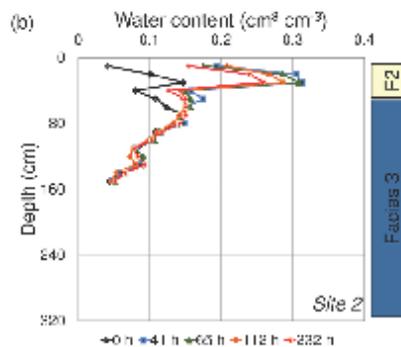
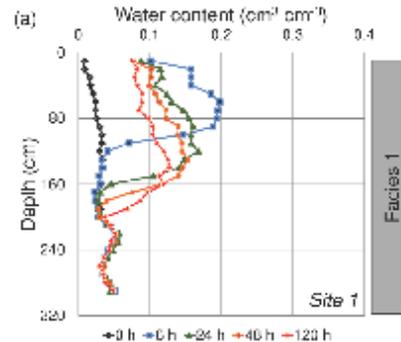


Fig. 4. Volumetric water content (mean values) monitored with vertical neutron probe after watering of the soil surface (10 cm h^{-1} for 4 h) at (a) sites 1 and (b) 2 (see locations in Fig. 1b)

Table 1. Uncertainties associated with measurements of the volumetric water content (neutron probe sounding, CPN 503DR, CPN International Inc.) for the three sedimentary facies under study.

	Mean measurement uncertainty
	$\text{cm}^3 \text{ cm}^{-3}$
Facies 1 (sand)	0.014
Facies 2 (silty sand)	0.038
Facies 3 (clayey sand)	0.028

The unsaturated water flux was investigated under controlled conditions at two sites representative of the facies described above (Fig. 1b): a 1-m^2 area of the soil surface was watered at a rate of 10 cm h^{-1} for 4 h; water content was then monitored with vertical neutron probes (Fig. 4). Calibration and instrumental maximum errors were estimated according to International Atomic Energy Agency (IAEA) recommendations (IAEA, 2003) (Table 1). This experiment was conducted in November 2009 following

the monsoon rainy season, and the potential evaporation rate was estimated by multiplying Penman–Monteith reference evapotranspiration (ET_o) by 1.05 (Allen et al., 1998); plant transpiration was assumed to be negligible (Eilers et al., 2007). Figure 4 shows the geology of the two surveyed profiles with the three sedimentary facies. An inverse one-dimensional modeling of the watering experiments was performed to infer the corresponding soil hydraulic parameters.

One-Dimensional Modeling of Watering Experiments

The one-dimensional Richards' equation describing vertical water movement in a variably saturated porous media can be formulated as (Richards, 1931):

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial z} \left[K(b) \left(\frac{\partial b}{\partial z} \right) - K(b) \right] - S \quad [1]$$

where θ is volumetric water content ($L^3 L^{-3}$), t is time (T), z is vertical space coordinate (L), b is the water pressure head (L), K is unsaturated hydraulic conductivity ($L T^{-1}$), and S is the sink term ($L^3 L^{-3} T^{-1}$). The HYDRUS-1D software package (Simunek et al., 2008) was used to solve Eq. [1]. This implements the Mualem–van Genuchten soil hydraulic function (Mualem, 1976; van Genuchten, 1980), which is analytically expressed by:

$$\theta(b) = \begin{cases} \theta_r + \frac{\theta_s - \theta_r}{(1 + |\alpha b|^n)^m}, & b < 0 \\ \theta_s, & b \geq 0 \end{cases} \quad [2]$$

$$K(b) = \begin{cases} K_{ms} S_e^l \left[1 - (1 - S_e^{1/m})^m \right]^2, & b < 0 \\ K_{ms}, & b \geq 0 \end{cases} \quad [3]$$

$$\text{with } S_e = \frac{\theta(b) - \theta_r}{\theta_s - \theta_r}; \quad m = 1 - \frac{1}{n}$$

where θ_r and θ_s are residual and saturated volumetric water content, respectively ($L^3 L^{-3}$), α is the inverse of air-entry value (L^{-1}), n is a pore-size distribution index (\cdot), l is a pore-connectivity parameter (\cdot), and K_{ms} is saturated hydraulic conductivity ($L T^{-1}$).

Soil profiles 1 (Fig. 4a) and 2 (Fig. 4b) were discretized into 43 and 76 equally spaced nodes, respectively. An atmospheric boundary condition was set for the topsoil surface consisting of a prescribed flux which may switch to a prescribed pressure head when surface ponding occurs (Simunek et al., 2008). The potential fluid flux across the soil surface corresponded to the difference in the watering rate (i.e., 10 cm h^{-1} for 4 h, and then 0 cm h^{-1}) and the mean potential evaporation rate (estimated at 0.23 cm h^{-1} in November).

At the bottom of the profiles, where invariant water content was measured, a prescribed pressure head boundary condition was assigned. In addition, an empirical compensation function was included through the sink term to account for possible horizontal losses due to the higher pressure head under the watering area (Le Coz, 2010). This function was based on the horizontal fluxes computed for 100 three-dimensional simulations performed with the SWMS_3D finite element code (Simunek et al., 1995).

Monte-Carlo inversion procedure

Water content at distinct observation depths and times was extracted from the simulation results for a given set of soil hydraulic parameters ($\theta_r, \theta_s, \alpha, n, K_{ms}, l$). The RMSE was calculated against the measured water content according to:

$$\text{RMSE} = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (\theta_i^{\text{sim}} - \theta_i^{\text{obs}})^2} \quad [4]$$

where n is the number of measurements (\cdot), θ_i^{sim} and θ_i^{obs} are simulated and measured water content at depth/time i , respectively ($L^3 L^{-3}$). The RMSE is a measure of the overall goodness-of-fit which is commonly used as an objective function, i.e., the parameter set is iteratively adjusted so that the RMSE is minimized. However, by integrating the maximum error associated with the measurements (Table 1) in Eq. [4], an admissible RMSE (RMSE_{adm}) could be defined as:

$$\text{RMSE}_{\text{adm}} = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (\theta_i^{\text{cmax}} - \theta_i^{\text{cmin}})^2} \quad [5]$$

where θ_i^{cmax} and θ_i^{cmin} are the maximum and minimum uncertainty bounds of the measured water content at depth/time i , respectively ($L^3 L^{-3}$). According to this procedure, all the parameter sets that resulted in a $\text{RMSE} < \text{RMSE}_{\text{adm}}$ were considered equivalent and acceptable.

To account for this assumption, the suggested inversion procedure was based on a Monte-Carlo sampling procedure (e.g., Mertens et al., 2005): (i) a number of parameter sets were randomly generated each within its feasible region using a uniform distribution and the corresponding model outputs were evaluated with respect to the RMSE (Fig. 5a), (ii) then the acceptable parameter sets (i.e., those which resulted in $\text{RMSE} < \text{RMSE}_{\text{adm}}$) were identified and PDFs were built describing the fitting frequencies depending on the parameter values (Fig. 5b). This approach was easily used on the one-dimensional case study for which short computational times allowed rapid exploration of the parameter space concerned.

The parameter spaces to explore were derived from the Rosetta PTF (Schaap et al., 2001), which includes a class PTF, consisting of a look-up table listing the average and the standard deviation of parameters for each USDA soil texture class. Parameter brackets

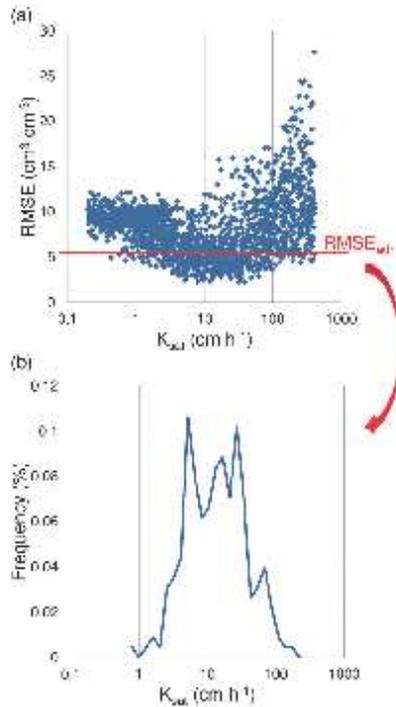


Fig. 5. Inversion procedure, example of hydraulic conductivity (K_{sat}) of facies 1: (a) 6000 values of the soil hydraulic parameter were randomly generated using a uniform distribution and the corresponding model outputs were evaluated with respect to the root mean square error (RMSE); (b) the acceptable parameter values (i.e., which resulted in $RMSE < RMSE_{adm}$) were then identified to build a probability density function.

could therefore be predicted for the three sedimentary facies of interest (Table 2). These brackets were then refined by considering the following assumptions, resulting in three variable parameters (θ_p , α , K_{sat}) and three fixed parameters (θ_r , n , l) (Table 2):

1. Because of its poor predictability from basic soil properties and its minor role in the description of retention data (Leij et al., 2007), the residual volumetric water content (q_r) was set to the driest water content value measured in the field, i.e., $0.03 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$.
2. Both the inverse of the air-entry value (α) and the pore-size distribution index (n) govern the shape of the water retention curve, accordingly the product αn was used as a single characteristic shape index (Leij et al., 2007); therefore, water retention characteristics can be adequately modeled using a variable α with a constant n (Hills et al., 1992).

Table 2. Soil hydraulic parameter brackets for the three facies under study derived from the Rosetta pedotransfer function (PTF) (refined after Schaap et al., 2001).

Parameter	Facies 1 (sand/loamy sand)		Facies 2 and 3 (loamy sand/sandy loam/loam)	
	Min.	Max.	Min.	Max.
θ_r ($\text{cm}^3 \text{ cm}^{-3}$)	0.05		0.06	
θ_s ($\text{cm}^3 \text{ cm}^{-3}$)	0.25	0.53	0.20	0.63
α (cm^{-1})	1×10^{-3}	0.94	1×10^{-4}	0.72
n (-)	2.35		1.62	
K_{sat} (cm h^{-1})	0.23	405	7×10^{-3}	83
l (-)	0.5			

3. The pore-connectivity parameter (l) was set to 0.5, a common assumption based on the work of Mualem (1976) (Jimenez-Martinez et al., 2009).

For both soil profiles, water content was simulated with 6000 sets of randomly generated parameters. The acceptable values for each of the variable parameters were analyzed in the form of PDFs (Fig. 6).

Probability density functions

Probability density functions associated with the saturated volumetric water content (θ_s) showed that for facies 1 (Fig. 6a), maximum densities were reached for θ_s ranging from 0.35 to $0.40 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$ whereas the densities remained very low for θ_s higher than $0.45 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$. For facies 2 and 3 (Fig. 6b and 6c), maximum densities were observed for θ_s ranging from 0.40 to $0.55 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$. Relatively high θ_s values therefore appeared to be more suitable for finer textural classes. This result was in accordance with the commonly used soil databases (e.g., Schaap and Leij, 2000). Although this trend was consistent with results in the literature, in the experiment, watering was insufficient to completely saturate the soil profiles and consequently, to accurately constrain parameter θ_p , especially for facies 2 and 3 (Fig. 4b).

Inferring the inverse of the air-entry value parameter (α) showed that, despite relatively large spreads, the PDFs were nearly unimodal in their distribution, centered on 0.02 , 0.03 , and 0.01 cm^{-1} for facies 1, 2, and 3, respectively (Fig. 6). Equation [2] solved with these mean values indicated that the water content related to a given pressure head was lower in facies 1 than in facies 2 and higher in facies 3. Laboratory measurements performed on a similar soil type (i.e., subarid sandy brown soil) sampled in northern Senegal showed that an increase in the silt or clay fractions resulted in higher water content at a fixed pressure head (Cornet, 1980). Consequently, although facies 2 and 3 were associated with the same USDA soil classes, the texture of facies 3 may be finer.

The saturated hydraulic conductivity (K_{sat}) PDFs appeared to be narrow, especially for facies 1 and 2 (Fig. 6). The distributions were centered on 13.20 , 1.60 , and 0.35 cm h^{-1} for facies 1, 2, and 3,

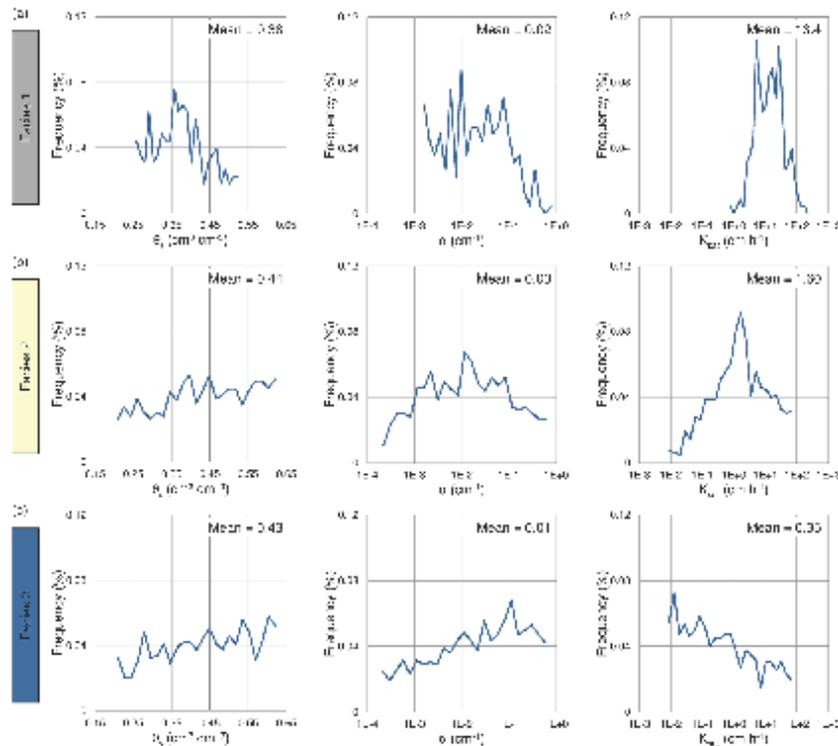


Fig. 6. Probability density functions (PDFs) of the nonfixed soil hydraulic parameters (i.e., saturated volumetric water content, θ_s ; inverse of the air-entry value parameter, α ; and saturated hydraulic conductivity, K_{sat}) obtained for the three facies under study: (a) facies 1, (b) facies 2, and (c) facies 3. For one-dimensional-distributed modeling, hydraulic parameter sets were randomly selected from these PDFs; for three-dimensional-modeling the mean PDF values were used.

respectively. A strong correlation between this parameter and soil texture is commonly accepted and numerous empirical formulas used for the determination of the K_{sat} of a porous medium from its grain size distribution indicate a decrease in K_{sat} value with an increase in the fineness of the texture (Tillmann et al., 2008). The differences of about one order of magnitude observed between facies 1 and 2 and between facies 2 and 3 were therefore fully consistent with a finer texture for facies 3.

◆ Groundwater Recharge Modeling

One-Dimensional-Distributed Modeling

Based on one realization of the three-dimensional geological model of the Komadugu Yobe River alluvium, a set of one-dimensional vertical soil profiles that were representative of facies heterogeneities was generated. For each of these profiles, three

combinations (1 per facies) of soil hydraulic parameters were randomly selected from the outputs of the Monte-Carlo inversion procedure (Fig. 6). The HYDRUS-1D software package was then used to simulate variably saturated flow within each one-dimensional soil profile independently. The lateral extension (in both x and y directions) of the three-dimensional geological model was set to 400 m, which corresponds to the median length scale identified for the facies heterogeneities (Le Coz et al., 2011). As the horizontal resolution of the model was 28.5 m (Le Coz et al., 2011), this resulted in 196 one-dimensional profiles. A uniform vertical width (in the z direction) of 5 m was fixed and was considered to be representative of the mean water table depth under cultivated areas in the KY River valley (Le Coz, 2010). The vertical discretization comprised 62 elements; the nodal spacings were reduced to 2 cm at the soil surface where the highest head gradients and flow velocities were expected.

This one-dimensional-distributed modeling approach was applied to assess the influence of (i) soil hydraulic parameter uncertainties and (ii) the proportion of clayey sand (facies 3) in simulated groundwater recharge under varying conditions (see "Boundary and Internal Conditions"). Vertical variability of soil hydraulic parameters could result in numerical convergence for some profiles; these profiles were switched and the simulation was not stopped. This approach did not take horizontal fluxes into account and the resulting recharge values were therefore potentially biased. Horizontal fluxes within aquifer layers were therefore estimated using a three-dimensional modeling approach.

Three-Dimensional Modeling

The mean values of the soil hydraulic parameter PDFs (Fig. 6) were assigned to each of the three facies of the three-dimensional geological model realization. The SWMS_3D finite element code (Simunek et al., 1995), which is widely used by the vadose zone hydrology community (e.g., Javaux et al., 2006; Das et al., 2010), was then used to simulate variably saturated flow within this medium. Water flow is solved using Richards' equation, which can be written in the three-dimensional form as:

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left[K(h) \left(\frac{\partial h}{\partial x} \right) \right] + \frac{\partial}{\partial y} \left[K(h) \left(\frac{\partial h}{\partial y} \right) \right] + \frac{\partial}{\partial z} \left[K(h) \left(\frac{\partial h}{\partial z} \right) - K(h) \right] - S \quad [6]$$

where θ is volumetric water content ($L^3 L^{-3}$), t is time (T), x and y are horizontal space coordinates (L), z is vertical space coordinate (L), h is water pressure head (L), K is unsaturated hydraulic conductivity ($L T^{-1}$), and S is sink term ($L^3 L^{-3} T^{-1}$). Both the domain extension and the spatial discretization were set in the same way as for the one-dimensional-distributed model.

The three-dimensional modeling approach was used to compute groundwater recharge under varying conditions (see "Boundary and Internal Conditions") by taking the horizontal fluxes in the vadose zone into account. The spatial variability of soil hydrodynamic parameters was limited, i.e., a uniform value was used for each facies to ensure numerical convergence.

Boundary and Internal Conditions

The one-dimensional-distributed and three-dimensional simulations were performed under both rainfed (millet) and irrigated (sweet pepper) cropping conditions. A 2-yr period was used (from June 2006 to May 2008), including two significantly different monsoon seasons in terms of cumulative rainfall, 306 mm in 2006 and 530 mm in 2007.

No flow boundary condition was imposed on the sides of the domain and a null pressure head was fixed at the bottom which corresponds to the water table level. In this study, the assumption

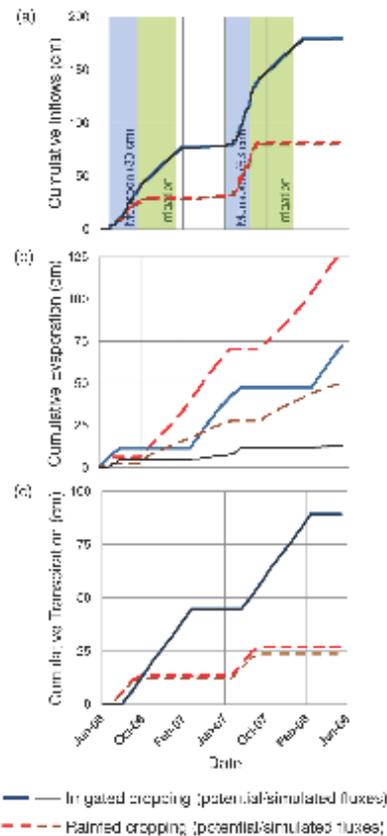


Fig. 7. Cumulative potential fluxes used for the one-dimensional-distributed and three-dimensional modeling under rainfed (millet) and irrigated (sweet pepper) cropping conditions and corresponding mean simulated actual fluxes: (a) water inflows across the surface (precipitation + irrigation), (b) evaporation rate, and (c) transpiration rate.

of a steady state water table level at a local/midterm scale was considered. Indeed, the piezometric signal related to the additional recharge under localized irrigated areas was quickly dissipated in both time and space due to (i) the relative high transmissivity (5×10^{-2} to $5 \times 10^{-3} m^2 s^{-1}$) of the unconfined aquifer below the valley (Gaultier, 2004), and (ii) the large extent of this aquifer with well-constrained pressure head boundary conditions (Fig. 1a).

An atmospheric boundary condition was set for the soil surface (Simunek et al., 1995, 2008). The potential fluid flux, which corresponds to the difference between the rainfall or irrigation rate (Fig. 7a) and the potential evaporation rate (Fig. 7b), was computed

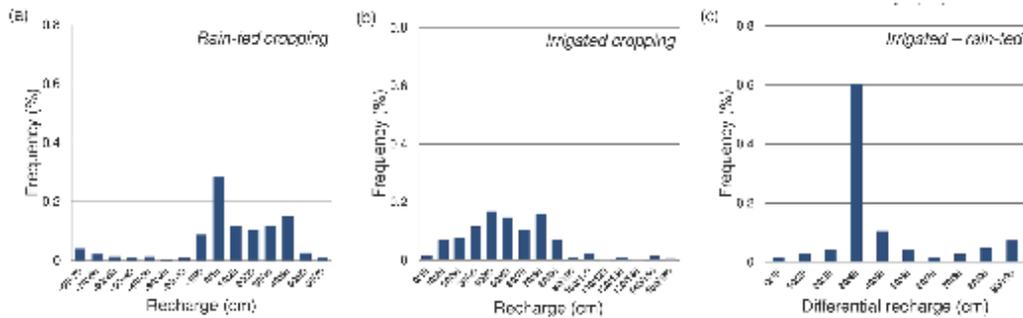


Fig. 9. Cumulative groundwater recharge simulated for the period 2006–2008 on 196 one-dimensional soil profiles (one-dimensional-distributed modeling approach) under (a) rainfed and (b) irrigated cropping conditions; and (c) difference in cumulative groundwater recharge between irrigated and rainfed cropping conditions computed for each of the 196 one-dimensional soil profiles.

Table 3. Correlation coefficient (maximum values are in *italics*) between groundwater recharge simulated for the period 2006–2008 on 196 one-dimensional and (i) proportion of clayey sand and (ii) soil hydraulic parameters under both rainfed and irrigated cropping conditions.

Cropping conditions	Clayey sand prop.	θ_s	α	K_{sat}	θ_s	α	K_{sat}	θ_s	α	K_{sat}
		Facies 1 (sand)			Facies 2 (silty sand)			Facies 3 (clayey sand)		
Rain-fed	0.06	0.15	0.01	0.04	0.10	<i>0.54</i>	0.12	0.08	0.04	0.08
Rain-fed (recharge > 0)	-0.02	-0.07	-0.23	0.23	0.07	<i>0.65</i>	0.09	-0.11	-0.16	0.05
Rain-fed (recharge < 0)	<i>0.38</i>	-0.11	<i>0.34</i>	-0.06	0.25	0.24	0.05	0.08	0.29	0.08
Irrigated	0.03	0.14	0.13	0.17	0.08	<i>0.74</i>	-0.12	0.05	0.05	0.07
Differential recharge	0.09	0.15	0.21	0.27	0.07	0.16	0.04	0.07	0.17	0.08

low spatial variability in groundwater recharge, i.e., spatial differences in groundwater recharge < 5 cm (Fig. 10a, 10b). The higher recharge areas appeared to correspond to areas with a lower proportion of clayey sand (Fig. 10d). The differential recharge also appeared to be slightly higher when proportion of clayey sand was lower (Fig. 10c).

◆ Reliability and Uncertainty Analysis

The inference of the soil hydraulic parameters was performed using an inverse modeling approach based on water contents measured in the field. The spreads of the resulting PDFs were influenced by both the portion of the water retention curve associated with the range of the data and the quality of the measurement. The width of the spreads thus varied with the facies and the parameter concerned, but the centers of the PDFs were in accordance with the classification made in the field, i.e., sand (facies 1), silty sand (facies 2), and clayey sand (facies 3). The suggested method thus allowed a more detailed description of soil hydraulic parameter uncertainty than PTFs, which could notably reduce the uncertainty in simulated groundwater recharge (Wang et al., 2009; Baroni et al., 2010).

The one-dimensional-distributed modeling highlighted the fact that the cumulative groundwater recharge associated with the soil hydraulic parameter PDFs was still highly variable. The most influential parameter was shown to be the air-entry value (α) of the superficial sediments. This may be explained by the fact that a higher α value led to a lower water content for a given pressure head and thus to lower hydraulic conductivity (Eq. [2] and [3]); when the surface condition was dry, i.e., most of the time in this semiarid area, and α was high, upward capillarity flow toward the surface was therefore limited, actual evapotranspiration was reduced and cumulative recharge increased (Wang et al., 2009). Accordingly, for relatively low α values, the influence of this parameter would be expected to be reduced: this assumption was confirmed, the simulated negative recharge being mainly governed by the underlying configuration of the soil profile, especially the proportion of clayey sand. When the hydrodynamic parameters were fixed, i.e., for the three-dimensional modeling, the secondary influence of the proportion of clayey sand was also shown.

The high uncertainty in simulated recharge under both rainfed and irrigated cropping conditions made the mean absolute values difficult to interpret. A significant fraction of recharge was negative,

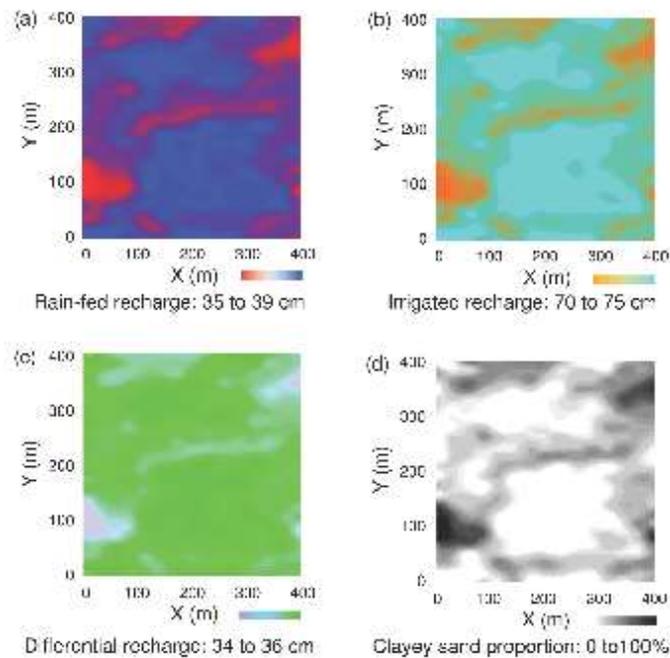


Fig. 10. Cumulative groundwater recharge maps simulated for the period 2006–2008 with the three-dimensional modeling approach under (a) rainfed and (b) irrigated cropping conditions; (c) differential recharge (irrigated–rainfed) and (d) corresponding map of the proportion of clayey sand in the vadose zone.

in particular under rainfed cropping conditions, involving upward soil moisture fluxes from the lower boundary. This result differed from the results of studies that considered a unit gradient flow lower boundary condition that enforces positive recharge values; this boundary condition may not be valid for shallow where water tables, where upward groundwater fluxes may occur through either capillary rise or evapotranspiration (Wang et al., 2009). However, for any soil profile configuration (i.e., soil hydraulic properties, the proportion of different facies), the differential recharge computed between the two cropping conditions appeared to be relatively constant, with ~60% of the values being within a range of less than 5 cm yr^{-1} (Fig. 11). Sensitivity to the depth to the water table was also tested for twice the water table depth initially considered (10 m in depth, instead of 5 m). The order of magnitude of the simulated recharge was not significantly modified (although slightly less scattered) and 50% of the differential recharge values remained within a range of less than 5 cm yr^{-1} (Fig. 11).

Differential groundwater recharges between irrigated and rainfed cropping conditions were estimated at 15 and 25 cm for dry and wet years, respectively (Fig. 8). These values correspond to 18%

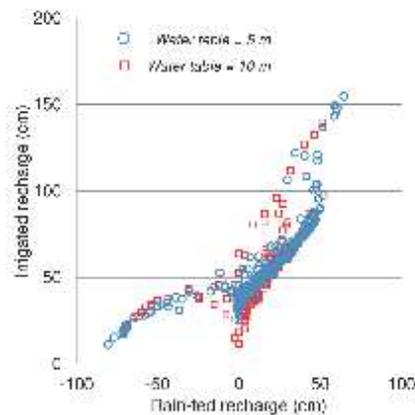


Fig. 11. Scatter plot of cumulative groundwater recharge simulated under rainfed and irrigated cropping conditions for the period 2006–2008 with the one-dimensional distributed approach: for a water table level fixed at a depth of 5 m (blue circle) and for water table level fixed at a depth of 10 m (red square).

and 23% of precipitation plus irrigation. Previous compilation of recharge rates in studies of irrigated semiarid areas worldwide indicates that, as a function of the potential inflow, recharge rates increase from 1% to 25%, with an average of ~15% (Scanlon et al., 2006). The rapid increase in irrigated areas, e.g., 400 ha y^{-1} in the part of the Komadugu Yobe River valley located in Niger in the last decade (Pret and Konate, 2005), could have therefore resulted in a significant excess in the water budget of the Quaternary aquifer (Gautier, 2004). This excess in groundwater recharge could explain the stable or even slightly rising water table levels observed during the 1990–2010 time period within the limits of the Komadugu Yobe River valley, despite a decreasing trend in the discharge of the River to Lake Chad in the last few decades (Leduc et al., 1998; Zairi, 2008). This additional input needs to be compared with the increase in withdrawals for irrigation, either directly from the aquifer or indirectly from the Komadugu Yobe River.

Conclusions

The main results of this study can be summarized as follows:

1. An accurate estimate of groundwater recharge through shallow vadose zones requires accurate identification of the soil hydraulic parameters that govern both water retention and hydraulic conductivity curves.
2. In this semiarid region, the shape parameters of the retention curve of the superficial soil layer play a determining role in the simulation of evapotranspiration processes and are the most critical sources of uncertainty in estimating recharge.
3. Within the Komadugu Yobe River valley, despite high uncertainties in simulated groundwater recharge under both rainfed and irrigated cropping conditions, the differential recharge could be well constrained, around 15 cm in a dry year and 25 cm in wet year.
4. The increase in groundwater recharge estimated for the Komadugu Yobe River valley corresponds to 18 to 23% of precipitation plus irrigation and is consistent with previous studies at a global scale.

The method to estimate changes in fluxes described here can be used in other semiarid regions. It is particularly suitable for shallow aquifers with relatively rapid fluxes within the vadose zone which prevent the use of conservative tracers (e.g., chloride) to estimate changes in water fluxes in response to changes in land use.

Acknowledgments

The first author received a 3-years Ph.D. funding from the French Ministry of research (2007–2010). Field work was facilitated by IFD funding, logistic facilities, and support in Niger. The Regional Direction of Hydraulics in Diffa (Niger) greatly helped with respect to access to the field. The French research programs ANR "Sahel" (Sahara and Sahel: lessons from the past, 2007–2010) and INSU/EC2CO program "Repas" (2008–2010) partly supported field work and laboratory analyses. The authors wish to thank Samir Magdalan (University of Montpellier 2, France) and the two anonymous reviewers for helpful and constructive comments on preliminary versions of this manuscript.

References

- Allen, R.G., L.S. Pereira, D. Raes, and M. Smith. 1998. Crop evapotranspiration: Guidelines for computing crop water requirements. FAO Irrig. Drain. Pap. 56. FAO, Rome.
- Baroni, G., A. Facchi, C. Gandolfi, B. Ortuni, D. Horeschi, and J.C. van Dam. 2010. Uncertainty in the determination of soil hydraulic parameters and its influence on the performance of two hydrological models of different complexity. *Hydrol. Earth Syst. Sci.* 14:231–270. doi:10.5194/hess-14-231-2010
- Cornet, A. 1980. Observations of the relation between retention capacity, pressure head and soil texture for sandy soils in northern Senegal (in French). *Cah. ORSTOM. ser. Biol.* 42:33–39.
- Das, N.N., B.P. Mohanty, and Y. Elendiev. 2010. Characterization of effective saturated hydraulic conductivity in an agricultural field using Karhunen-Loève expansion with the Markov chain Monte Carlo technique. *Water Resour. Res.* 46:W06321. doi:10.1029/2008WR007100
- Doil, P., H. Hoffmann-Dobrev, F.T. Portmann, S. Siebert, A. Eicker, M. Rodell, G. Strassberg, and B.R. Scanlon. 2012. Impact of water withdrawals from groundwater and surface water on continental water storage variations. *J. Geodyn.* 59–60:143–176. doi:10.1016/j.jog.2011.05.001
- Eilers, V.H.M., R.C. Carter, and K.R. Rushton. 2007. A single layer soil water balance model for estimating deep drainage (potential recharge): An application to cropped land in semiarid North-east Nigeria. *Geoderma* 140:119–131. doi:10.1016/j.geoderma.2007.03.011
- Ficklin, D.L., E. Luedeling, and M. Zhang. 2010. Sensitivity of groundwater recharge under irrigated agriculture to changes in climate, CO₂ concentrations and canopy structure. *Agric. Water Manage.* 97:1039–1050. doi:10.1016/j.agwat.2010.02.009
- Gautier, G. 2004. Recharge and paleorecharge of a superficial aquifer in the Sahel (southeast Niger): Geochemistry and dynamic approaches (in French). Ph.D. diss. Univ. Paris-Sud Orsay, France.
- Hills, R.G., D.B. Hudson, and P.J. Wierenga. 1992. Spatial variability at the Las Cruces trench site. In: M.Th. van Genuchten, editor, Indirect methods for estimating the hydraulic properties of unsaturated soils. Univ. of California, Riverside, CA, p. 529–538.
- IAEA. 2003. Neutron and gamma probes: Their use in agronomy. 2nd ed. Training Course Series 16. IAEA, Vienna.
- Javaux, M., J. Vanderborght, R. Kasteel, and M. Vanloooster. 2006. Three-dimensional modeling of the scale- and flow-rate dependency of the dispersion in a heterogeneous unsaturated sandy monolith. *Vadose Zone J.* 5:315–328. doi:10.2136/vzj2005.0036
- Jimenez-Martinez, J., T.H. Skaggs, M.Th. van Genuchten, and L. Candela. 2009. A root zone modelling approach to estimating groundwater recharge from irrigated areas. *J. Hydrol.* 367(1–2):138–149. doi:10.1016/j.jhydrol.2009.01.002
- Kim, J.H., and R.B. Jackson. 2012. A global analysis of groundwater recharge for vegetation, climate, and soils. *Vadose Zone J.* 11(1). doi:10.2136/vzj2011.0021RA
- Kurtzman, D., and B.R. Scanlon. 2011. Groundwater recharge through vertisols: Irrigated cropland vs. natural land, Israel. *Vadose Zone J.* 10:662–674. doi:10.2136/vzj2010.0109
- Leblanc, M. 2002. Use of GIS and remote sensing for water resources management of large semiarid regions—A case study of the Lake Chad Basin, Africa. Ph.D. diss. Univ. of Glamorgan and Poitiers Univ, Wales, UK.
- Le Coz, M. 2010. Hydrogeological modeling of heterogeneous deposits: The Komadugu Yobe alluvium (Lake Chad basin, southeastern Niger) (in French). Ph.D. diss. Montpellier 2 Univ., Montpellier, France.
- Le Coz, M., P. Genthon, and P.M. Adler. 2011. Multiple-point statistics for modeling facies heterogeneities in a porous medium: The Komadugu-Yobe alluvium, Lake Chad basin. *Math. Geosci.* 43(7):861–878. doi:10.1007/s11004-011-9333-6
- Leduc, C., O. Salifou, and M. Leblanc. 1998. Evolution des ressources en eau dans le département de Diffa (bassin du lac Tchad, sud-est nigérien). In: E. Servat et al., editors, Water resources variability in Africa during the XXth century. IAHS Press, Oxfordshire, UK, p. 281–288.
- Leij, F.J., A. Sciortino, R. Haverkamp, and J.M.S. Ugalde. 2007. Aggregation of vertical flow in the vadose zone with auto- and cross-correlated hydraulic properties. *J. Hydrol.* 338:96–112. doi:10.1016/j.jhydrol.2007.02.032
- Mertens, J., H. Madsen, L. Feyen, D. Jacques, and L. Feyen. 2004. Including prior information in the estimation of effective soil parameters in unsaturated zone modeling. *J. Hydrol.* 294:251–269. doi:10.1016/j.jhydrol.2004.02.011
- Mertens, J., H. Madsen, M. Kristensen, D. Jacques, and J. Feyen. 2005. Sensitivity of soil parameters in unsaturated zone modeling, and the relation between effective, laboratory, and in-situ estimates. *Hydrol. Processes* 19:1611–1633. doi:10.1002/hyp.5591
- Muellem, Y. 1976. A new model for predicting hydraulic conductivity of unsaturated porous media. *Water Resour. Res.* 12(3):313–322. doi:10.1029/WR012i003p00313
- Nemes, A., M.G. Schaap, F.J. Leij, and J.H.M. Wosten. 2001. Description of the unsaturated soil hydraulic database UNSODA version 2.0. *J. Hydrol.* 251(3–4):151–162. doi:10.1016/S0022-1694(01)00465-6
- Pret, P.F. and S. Konate. 2005. Impact of sweet pepper cropping and commercialization in the Diffa region in Niger (in French). Agrifor Consult, Final Report.

- Richards, L.H. 1931. Capillary conduction of liquids through porous mediums. *Physics* 1:318–333. doi:10.1053/1.1745010
- Saxton, K.E., and W.J. Rawls. 2006. Soil water characteristic estimates by texture and organic matter for hydrologic solutions. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 70(5):1569–1578. doi:10.2136/sssaj2005.0117
- Scanlon, B.R., K.E. Keese, A.L. Flint, L.E. Flint, C.B. Gaye, W.M. Edmunds, and I. Simmers. 2006. Global synthesis of groundwater recharge in semiarid and arid regions. *Hydrological Processes* 20:3335–3370. doi:10.1002/hyp.6335
- Scanlon, B.R., I.M. Jolly, M. Sophocleous, and L. Zhang. 2007. Global impacts of conversions from natural to agricultural ecosystems on water resources: Quantity versus quality. *Water Resour. Res.* 43:W03437.
- Schaap M.G., and F.J. Leij. 2000. Improved prediction of unsaturated hydraulic conductivity with the Mualem-van Genuchten model. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 64:843–851. doi:10.2136/sssaj2000.643843x
- Schaap, M.G., F.J. Leij, and M.Th. van Genuchten. 2001. ROSETTA: A computer program for estimating soil hydraulic parameters with hierarchical pedotransfer functions. *J. Hydrol.* 251(3–4):163–176. doi:10.1016/S0022-1694(01)00466-8
- Schaap, M.G., A. Nemes, and M.Th. van Genuchten. 2004. Comparison of models for indirect estimation of water retention and available water in surface soils. *Vadose Zone J.* 3:1455–1463.
- Siebert, S., J. Burke, J.M. Faures, K. Frenken, J. Hoogeveen, P. Doll, and F.T. Portmann. 2010. Groundwater use for irrigation— a global inventory. *Hydrological Earth Syst. Sci.* 14:1863–1880. doi:10.5194/hess-14-1863-2010
- Siebert, S., P. Doll, J. Hoogeveen, J.M. Faures, K. Frenken, and S. Feick. 2005. Development and validation of the global map of irrigation areas. *Hydrological Earth Syst. Sci.* 9:535–547. doi:10.5194/hess-9-535-2005
- Simunek, J., K. Huang, and M.Th. van Genuchten. 1995. The SWMS_3D code for simulating water flow and solute transport in three-dimensional variably-saturated media, Version 1.0. Research Report 139, U.S. Salinity Laboratory, USDA, ARS, Riverside, CA.
- Simunek, J., M. Sejns, H. Saito, M. Sakai, and M. Th van Genuchten. 2008. The HYDRUS-1D software package for simulating the movement of water, heat, and multiple solutes in variably saturated media, ver. 4.0. HYDRUS Softw. Ser. 3, Dep. of Environ. Sci. Univ. of California, Riverside, CA.
- SOGETHA. 1962. Pedological studies within the Komadugu valley (in French). SOGHETA report, Paris.
- Tillmann, A., A. Engler, Z. Nyari, I. Fejes, J. Vanderborght, and H. Vereecken. 2008. Characterization of subsoil heterogeneity, estimation of grain size distribution and hydraulic conductivity at the Krauthausen test site using Cone Penetration Test. *J. Contam. Hydrol.* 93(1–2):57–73. doi:10.1016/j.jconhyd.2007.07.013
- van Genuchten, M.Th. 1980. A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 44(5):892–898. doi:10.2136/sssaj1980.03615995004400050002x
- Vrugt, J.A., G.H. Schoups, J.W. Hopmans, C.H. Young, W. Wallender, T. Harter, and W. Bouten. 2004. Inverse modeling of large-scale spatially distributed vadose zone properties using global optimization. *Water Resour. Res.* 40(6):W06303. doi:10.1029/2003WR002706
- Vrugt, J.A., P.H. Stauffer, T. Wöhling, B.A. Robinson, and V.V. Vesselinov. 2008. Inverse modeling of subsurface flow and transport properties: A review with new development. *Vadose Zone J.* 7(2):843–864. doi:10.2136/vzj2007.0078
- Wang, T., V.A. Zlotnik, J. Simunek, and M.G. Schaap. 2009. Using pedotransfer functions in vadose zone models for estimating groundwater recharge in semiarid regions. *Water Resour. Res.* 45:W04412.
- Wosten, J.H.M., A. Lilly, A. Nemes, and C. Lebas. 1999. Development and use of a database of hydraulic properties of European soils. *Geoderma* 90:169–183. doi:10.1016/S0016-7061(98)00132-3
- Wosten, J.H.M., Y.A. Pachepsky, and W.J. Rawls. 2001. Pedotransfer functions: Bridging the gap between available basic soil data and missing soil hydraulic characteristics. *J. Hydrol.* 251(3–4):123–150. doi:10.1016/S0022-1694(01)00464-4
- Zairi, R. 2008. Geochemical and hydrodynamic study of the unconfined aquifer of the Lake Chad Basin in Diffa (eastern Niger) and Borno (northeastern Nigeria) regions (in French). Ph.D. diss. Montpellier 2 Univ., Montpellier, France.

2.4. Gestion intégrée de l'eau et des engrais dans la Basse vallée de la Tarka (BVT)

La Basse Vallée de la Tarka est l'un des principaux axes de drainage et de collecte des eaux de ruissellements du moyen bassin du fleuve Niger. Importante composante des 15 à 20% des superficies cultivables du Niger, la BVT comprend des sols hydromorphes moyennement argileux qui reposent sur un réservoir phréatique peu profond et qui permet de ce fait une intensification des cultures de rente. Sa partie basse est le réceptacle d'abondants écoulements d'eau et de dépôts alluviaux fertiles. Cette disponibilité en eau a donné naissance à une petite agriculture irriguée traditionnelle. Cette culture irriguée s'est développée grâce à l'ouverture de larges débouchés à l'étranger, notamment pour les oignons (dont la production est principalement exportée vers le Ghana, le Nigeria, la Côte d'Ivoire et le Togo). Le développement de la filière oignon (500.000 tonnes par an) et sa bonne rentabilité économique ont encouragé une intensification de la culture. La poussée démographique et la pression sur la terre aidant, le paysage agraire traditionnel manuel est progressivement remplacé par une irrigation motorisée et le recours à des doses massives en engrais chimique. L'arrosage manuel est progressivement remplacé par l'arrosage motorisé et l'agriculture fait appel à des quantités croissantes d'engrais chimiques. Ceci nécessite une surveillance accrue pour prévenir toute dégradation irréversible des sols et de l'environnement. Ce travail, basé sur une double approche (enquête et expérimentation) présente l'état des pratiques actuelles de la fertilisation et de l'irrigation dans la BVT. Il fournit un point de départ pour une étude d'impact réel des pratiques agricoles courantes sur les ressources de la BVT. Il contribue à mieux apprécier les risques potentiels de dégradation d'une merveilleuse vallée.

Ce travail a été publié dans les *Annales de l'Université Abdou Moumouni*, Tome XIV-A, pp 13-25, 2013 ; **DAOUDA OUSMANE Sani, GUERO Yadji et BARAGE Moussa (2013)**. Irrigation et fertilisation de l'oignon (*Allium cepa*) dans la basse vallée de la Tarka.

Irrigation et fertilisation de l'oignon (*Allium cepa*) dans la basse vallée de la Tarka

DAOUDA OUSMANE Sani^{1*}, YAJI Guéro² et BARAGE Moussa²

⁰¹ Institut des Radio-Isotopes, BP 10 727, Université Abdou Moumouni de Niamey

⁰² Faculté d'Agronomie, BP : 10 660, Université Abdou Moumouni de Niamey

* Auteur correspondant Email : dsani@yahoo.fr

Résumé : Pays sahélien, sans littoral, le Niger est un territoire vaste de 1.267.000 km² environ. Le climat est très aride et seulement 15 à 20% de cette superficie s'apprête à l'agriculture. Malgré le poids de cette agriculture dans l'économie nationale (40% du PIB, 80% de la main d'œuvre etc.), la superficie irriguée est encore en dessous de 2%. La Basse vallée de la Tarka est une importante composante de la surface agricole utile du pays. Elle comporte des sols de bonne fertilité qui reposent sur un réservoir phréatique peu profond qui a permis le développement de la culture d'oignon. Aujourd'hui, la filière oignon, avec plus de 500.000 tonnes de production de bulbes frais, est la deuxième source de recette extérieure du Niger. La poussée démographique et la pression sur la terre aidant, l'intensification va en progressant et le paysage agricole traditionnel manuel est progressivement modifié par une irrigation motorisée et le recours à des doses massives en engrais chimique. Ce travail, qui associe une enquête et des mesures expérimentales décrit de façon comparative cette mutation, avec pour objectif de prévenir d'éventuel gaspillage et la protection de l'environnement et les ressources en eau et en sol. Le résultat montre que, chez les exploitants de petites superficies de moins de 0,3 ha et qui sont les plus nombreux, tout en ayant une bonne maîtrise de l'irrigation (manuelle ou motorisée), il y a une tendance à des apports d'engrais azoté disproportionnés pouvant aller jusqu'à 4 fois les doses recommandées. Le travail a également mis en évidence l'occurrence élevée de drainage gravitaire sur ces alluvions sableuses de la basse vallée de la Tarka. Ces deux facteurs conjugués, imposent d'attirer l'attention sur le risque réel de pollution de la nappe phréatique.

Mots-clés : Oignon, Irrigation, fertilisation, pollution, Niger

Irrigation and fertilization of Onion (*Allium cepa*) in the low Tarka valley.

Abstract: A landlocked and Sahel country, Niger is a vast territory of about 1.267.000km² in the Arid Sahelian zone. The climate is very dry and only 15-20% of the total area is an arable land. Despite the importance of agriculture in the national economy with (40% of GDP, 80% of the workforce etc...), the irrigated area is still below 2%. The Low Tarka Valley is an important component of this arable land, with a good soil fertility and shallow groundwater reservoir which allowed the farming and development of onion. Today, the onion industry, with more than 500.000 tons of fresh bulbs production, is the second largest Niger Republic source of external revenue. The relative high population growth and its consequence on land availability, led to an increasing agricultural intensification. The traditional and manual methods were roughly replaced by new technologies specially motorized irrigation and the use of massive doses of chemical fertilizers. This work, which combines survey and experimental measurements, described this mutation in a comparative way, with the aim of minimizing eventual waste and protecting the environment (water resources and soil). The result showed that, among small scale farmers with or exploiting (less than 0.3 ha) most important in number, while having a good irrigation control (manual or motorized), there was a trend of disproportionate use of nitrogen fertilizer, a rate 4 times higher than the recommended dose. The study also highlighted the occurrence of frequent gravity drainage on sandy alluvial soil of the low Tarka valley. These two associated factors it is important to note could constitute a real risk of pollution of groundwater.

Keywords: Onion, irrigation, fertilization, Pollution, Niger

1. Introduction

La ressource en eau se fait de plus en plus rare et les prévisions la donnent comme devant être l'un des plus importants handicaps pour le siècle actuel. L'irrigation qui consomme 70 pour cent du volume total d'eau douce utilisé [1], sera appelée à plus d'efforts d'optimisation, tout comme l'agriculture sera amenée à plus de rationalisation étant donné que 85% de la pollution des eaux lui sont attribués.

La vallée de la Tarka est l'un des principaux axes de drainage et de collecte des eaux de ruissellements du moyen bassin du fleuve Niger. Importante composante des 15 à 20% des superficies cultivables du Niger, la BVT comprend des sols hydromorphes moyennement argileux qui reposent sur un réservoir phréatique peu profond et qui permet de ce fait une intensification des cultures de rente. Sa partie basse (Basse Vallée de La Tarka (BVT)) est le réceptacle d'abondants écoulements d'eau et de dépôts alluviaux. Cette disponibilité en eau a donné naissance à une petite agriculture irriguée traditionnelle. Cette culture irriguée s'est développée grâce à l'ouverture de larges débouchés à l'étranger, notamment pour les oignons (dont la production est principalement exportée vers le Ghana, le Nigeria, la Côte d'Ivoire et le Togo). Le développement de la filière oignon et sa relative rentabilité économique ont encouragé une intensification de la culture. L'arrosage manuel est progressivement remplacé par l'arrosage motorisé et l'agriculture fait appel à des quantités croissantes d'engrais chimiques. L'évolution des systèmes de cultures vers des apports d'eau et d'intrants agricoles de plus en plus croissants nécessite une surveillance accrue pour prévenir toute dégradation irréversible des sols et de l'environnement. Ce travail, basé sur une double approche (enquête et expérimentation) présente l'état des pratiques actuelles de la fertilisation et de l'irrigation dans la BVT. Il fournit un point de départ pour une étude d'impact réel des pratiques agricoles courantes sur les ressources de la BVT. Il contribue à mieux apprécier les risques potentiels de dégradation d'une merveilleuse vallée.

2. Matériels et Méthodes

2.1 Présentation de la Basse Vallée de la Tarka

Située à environ 600 Km à l'Est de Niamey, la basse vallée de la Tarka a une superficie de 500 km². Elle draine quelques 3.000 km² de plateaux, plaines et versants. C'est une formation exceptionnelle, un bassin fossilisé aux sols fertiles et au sous-sol gorgé d'eau, à faible profondeur, renouvelées chaque année par le ruissellement naturel des eaux de pluies. La région de Tahoua, avec principalement la vallée de la Tarka, constitue une véritable mine d'oignons, d'où proviennent plus de 75% des bulbes cultivés au Niger et en particulier le « violet de Galmi » qui fait la fierté du Niger, deuxième producteur et exportateur d'oignons en Afrique de l'ouest [2, 3, 4]

2.2 Les sols

Il s'agit des sols alluviaux souvent épais ayant à leur base une nappe phréatique peu profonde. De moins de 2 mètres à la fin de la saison des pluies le niveau statique de la nappe peu descendre jusqu'à 10 mètres de profondeur en fin de saison sèche [3]. Selon Dan Lamso et Guéro [5], ces sols ont fréquemment une texture argileuse jusqu'à 35% d'argile. Le pH eau est voisin de 7. La capacité d'échange cationique est faible (10 meq/100 g) et le complexe est saturé en calcium (75%). Leur teneur totale en argile et limon pouvant aller jusqu'à 45%, leur confère une bonne capacité de rétention en eau. Dans l'ensemble, ce sont des sols assez fertiles, aptes aux cultures maraîchères et céréalières. Le renouvellement des alluvions, assuré chaque année par l'épandage des eaux de ruissellement le long de la vallée, contribue à l'entretien de la fertilité de ces sols. La principale contrainte pour la durabilité de l'exploitation est la prise en compte du risque non négligeable de salinisation ou d'alcalinisation en cas d'irrigation et de fertilisation non contrôlées sous climat aride.

2.3 Matériel végétal

La variété la plus cultivée dans la vallée est le « Violet de Galmi », incontestablement pour son rendement et sa valeur commerciale élevés. La localité de Galmi qui a donné le nom à la variété est située à 20 km environ de notre site d'étude. L'oignon (*Allium cepa*) est une espèce originaire des climats tempérés qui s'adapte aux conditions tropicales. Les

températures nocturnes fraîches inférieures à 20°C favorisent la formation et une bonne croissance du bulbe d'oignon. C'est un légume à intérêt alimentaire mais surtout condimentaire. Le violet de Galmi se caractérise spécifiquement par une peau et une chair violette, un cycle semis-maturité de 160 jours et des rendements optimum en bulbe frais de 55 à 60 tonnes à l'hectare. Le bulbe a une forme épaisse et aplatie, de poids moyen de 150 g. le taux de matières sèches varie de 8 à 9%, ce qui lui confère une excellente qualité pour le stockage et la déshydratation

2.4 Estimation des doses d'engrais

Les quantités d'engrais sont pesées, juste avant leur application par les agriculteurs à l'aide d'une balance portable. La dose d'apport est calculée en divisant la quantité totale d'engrais apportée par la surface emblavée. L'azote est souvent apporté par fraction et la quantité totale apportée est obtenue en sommant les apports fractionnés sur l'ensemble du cycle cultural. La superficie de chaque exploitation a été mesurée à l'aide d'un quintuple décamètre ruban, au moment de la plantation de l'oignon.

2.5 Estimation des doses d'irrigation

Les enquêtes ont mis en évidence deux types d'irrigations qui se distinguent principalement par le mode d'exhaure :

- L'irrigation traditionnelle manuelle qui se fait à l'aide d'une puisette enalebasse de volume variable (Photo 1);
- L'irrigation motorisée qui s'est développée progressivement sur le périmètre grâce à l'appui du Projet Basse Vallée de la Tarka (Photo 2).



Photo 1 : Irrigation traditionnelle manuelle à la calebasse, à la basse vallée de la Tarka



Photo 2 : Irrigation motorisée à la basse vallée de la Tarka

La technique de distribution de l'eau la plus dominante est la méthode à la raie, dans des planches submersibles de 1 à 1,2 mètres de large et pouvant aller jusqu'à 10 mètres de long. Pour une irrigation avec motopompe, le volume (V_M) d'eau apporté par irrigation est donné par le produit du débit moyen (q_M) par la durée d'arrosage (t) :

$$V_M = q_M t$$

Le débit moyen est obtenu en faisant la moyenne des débits mesurés au cours de l'arrosage. La dose d'irrigation (I_M) est donnée par le rapport du volume d'eau à la surface irriguée (S_M):

$$I_M = \frac{V_M}{S_M} = \frac{q_M t}{S_M}$$

La surface (S_M) de l'exploitation est mesurée au moment du repiquage.

Pour une irrigation manuelle, le volume d'eau apporté est évalué par le produit du volume élémentaire de la puisette (v_p) par le nombre de puisettes (n). La dose d'irrigation I_m est donnée par le rapport du volume à la surface arrosée :

$$V_m = v_p n$$

$$I_m = \frac{V_m}{S_m} = \frac{v_p n}{S_m}$$

Ces mesures de l'irrigation sont effectuées au niveau de chaque parcelle d'enquête et au cours de chaque irrigation, de la mise en place de la culture à la récolte. Ainsi on a la dose pour chaque irrigation, le nombre d'irrigations et par conséquent la quantité totale d'eau totale apportée.

2.6 Mesures de l'humidité du sol

L'humidité du sol a été appréciée par deux techniques complémentaires constituant la méthode tension-neutronique. La méthode neutronique de mesure de l'humidité du sol se fait grâce à la sonde à neutrons (modèle CPN 503). La mesure de la tension de l'eau du sol a été réalisée grâce à un capteur électronique de tension (modèle DTE 1000). Un tensiomètre comprend une canne en PVC de longueur variable, terminée par une bougie poreuse et

bouchée dans sa partie supérieure par un bouchon spécial. Le système DTE1000 de Nardeux Humisol est une méthode de mesure indirecte de la tension de l'eau du sol. Une fois le dispositif installé et l'étalonnage réalisé, il permet de suivre la dynamique de la tension du sol en fonction du temps et des conditions pédo-climatiques. Les dispositifs de mesures tensio-neutroniques ont été installés au niveau de chacune des 16 exploitations retenues, à raison de quatre sites par exploitation. Les mesures neutroniques de l'humidité du sol ont concerné une profondeur de 120 cm, grâce à des tubes d'accès de sonde en PVC. Deux tensiomètres, l'un à 30 cm et l'autre à 80 cm de profondeur, sont installés au niveau de chaque site. Les relevés sont effectués tous les quinze jours, pendant toute la durée du cycle cultural. Ces mesures ont pour objet de permettre d'apprécier la disponibilité en eau du sol pour la culture d'oignon.

2.7 Estimation des rendements

Les rendements sont obtenus par des mesures directes sur des surfaces de 4 m² à l'intérieur des planches. Ces carrés de rendement ont été posés dès le repiquage de l'oignon à raison de deux par exploitation. La récolte des carrés de rendement est réalisée en même temps que l'agriculteur récolte son champ. Les bulbes et les feuilles fraîches sont pesés séparément sur le champ à l'aide d'une balance portable.

3. Résultats et discussions

3.1 Rendements

La production moyenne en matière fraîche totale (bulbes + feuilles) obtenue est de 63,7 t ha⁻¹, dont 51,9 t ha⁻¹ de bulbe frais, avec un coefficient de variation de 25% (Tableau I). Certains auteurs [6] ont rapporté jusqu'à 70 tonnes à l'hectare de bulbes frais. Les rendements obtenus à la BVT varient entre 35,7 et 110,7 tonnes à l'hectare. La production de l'oignon selon le mode traditionnel date de l'époque coloniale. Cependant, les parcelles dont les rendements deviennent bas, sont abandonnées au profit de nouvelles friches. Mais cette pratique se raréfie avec la poussée démographique, la pression de plus en plus forte sur la terre et le recours aux engrais chimiques.

Tableau I : Production d'oignon frais sur les sols alluviaux hydromorphes de la basse vallée de la Tarka

	Bulbe frais tha ⁻¹	Matière fraîche totale tha ⁻¹
Moyenne	51,9	63,7
Coefficient de Variation	24%	25%
Valeur Maximale	89,3	110,7
Valeur Minimale	31,5	35,7

3.2 La fertilisation chimique

L'enquête révèle que la fertilisation chimique la plus répandue dans la basse vallée de la Tarka est l'azote apporté préférentiellement sous forme d'urée. Le NPK sous la formule 15-15-15 est moins bien connu des exploitants et sous utilisé. Les apports des autres éléments majeurs comme le phosphore, le potassium et le soufre, ainsi que celui des oligoéléments, sont faibles. L'azote, élément déterminant du rendement semble être la préoccupation de presque tous les agriculteurs interrogés. Plus que la qualité, la quantité est le principal objectif des exploitants d'oignon de la basse vallée de la Tarka.

De façon générale, l'engrais est apporté en deux fois : au stade dit de "développement foliaire" et au stade de "bulbaison". Les doses moyennes apportées, déterminées sur les exploitations suivies sont de 196 kg N ha⁻¹ dans le cas de l'irrigation motorisée et de 311 kg N ha⁻¹ dans le

cas de l'irrigation manuelle (Tableau II). L'analyse statistique (test du t de Student) montre que cette différence est significative ($p=0,022$). Il y a actuellement très peu de travaux sur la fertilisation de l'oignon en milieu sahélien. Ces apports, comparés aux recommandations de Messiean [6], paraissent excessifs. Pour les irrigants motorisés, les doses d'apport varient entre 132 et 359 kgNha^{-1} . Pour les irrigants manuels les doses d'apport peuvent atteindre 444 kgNha^{-1} , soit l'équivalent de plus d'une tonne d'urée à l'hectare.

Tableau II : Apport d'azote sur oignon bulbe dans les sols alluviaux hydromorphes de la basse vallée de la Tarka

	Irrigation motorisée kg N ha^{-1}	Irrigation manuelle kg N ha^{-1}
Moyenne	197	311
cv	42%	30%
Valeur Maximale	359	444
Valeur Minimale	132	203
Signification(*)	Significatif ($p=0,022$)	

(*) test du t de Student au seuil de 0,05, avec le Logiciel Excel 2007

Si l'on considère que les coefficients réels d'utilisation des engrais azotés varient entre 15 à 39% [7], dépendant des conditions de cultures, l'azote non utilisé par les cultures reste considérable et sa destination doit préoccuper les agronomes ainsi que les exploitants. En général, l'azote ammoniacal est retenu dans le profil des sols hydromorphes ou subit une nitrification quand les conditions d'oxydo-réduction le permettent. Dans tous les cas, les apports très excédentaires, comme c'est le cas ici, se traduisent par une amplification des pertes en grande partie vers la profondeur par les eaux de drainage [8]. De tous les facteurs influant sur le volume de pertes en azote par drainage, les doses d'apport semblent être le facteur prédominant [9]. Cependant, l'irrigation trop abondante peut prendre le dessus en sol sableux profond [10, 11]. Ces deux conditions ; fortes doses d'apport et l'irrigation excédentaire, se trouvent souvent combinées dans certaines exploitations de la basse vallée de la Tarka. Le problème des apports excédentaires d'engrais est tellement fréquent chez les petits producteurs maraîchers, que certains auteurs [12, 13] ont suggéré que la voie la plus directe et la plus sûre pour améliorer le « cash-flow » des petites exploitations agricoles des pays en voie de développement, sans nouveaux investissements, est la rationalisation de la gestion des fertilisants. Cette question mérite plus d'attention surtout quand on considère l'effet néfaste des nitrates sur les ressources en eau et sur l'environnement.

L'évolution des rendements en bulbes frais en fonction des apports d'urée suit un ajustement linéaire avec un R^2 de 0,61 (Figure 1). Elle montre que, entre 138 et 460 kg N ha^{-1} , les apports d'azote ont un effet dépressif sur le rendement. La relation montre que pour chaque kg d'azote supplémentaire, le rendement en bulbe frais diminue de 50 kg . Ceci a malheureusement une double implication négative : la baisse de la production et les surcoûts inutiles d'engrais. La troisième implication est d'ordre environnemental par la pollution éventuelle de la nappe phréatique.

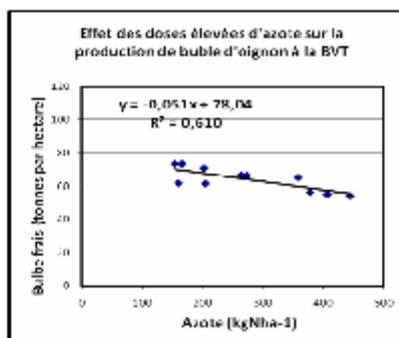


Figure 1 : relation entre la quantité d'azote apportée et le rendement en bulbe d'oignon frais.

3.3 Surface et engrais

La relation entre la surface cultivée et la dose d'engrais apportée est visualisée par la courbe décrite à la figure 2. La courbe de tendance ajustée à une fonction puissance, montre que la dose d'engrais apportée galope très vite, par facteur 2 à 3 quand on se rapproche des faibles superficies (< 0,1 ha), et diminue très lentement pour atteindre 147 kg/ha, au voisinage des superficies moyennes de 1 ha.

Ainsi, deux groupes se distinguent :

- d'une part les exploitants de superficies comprises entre 0,3 et 0,8 hectare (au nombre de 6), pour qui, la dose d'apport d'azote est stable entre 160 et 200 kg N ha⁻¹ ;
- d'autre part les petits exploitants de superficie inférieure à 0,2 hectare (au nombre de 10), où les doses d'apport semblent moins bien maîtrisées, avec des apports pouvant atteindre 460 kg N ha⁻¹. Ces petits exploitants s'approvisionnent généralement en engrais chez des petits détaillants qui le vendent par "tiya", une mesure locale traditionnelle qui fait approximativement 2 à 3 kg. La tendance au gaspillage est alors plus élevée que chez les grands exploitants qui l'achètent par sac de 50 kg.

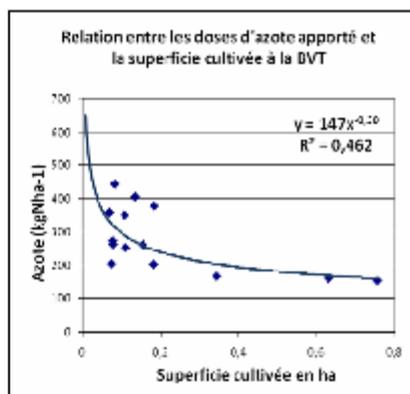


Figure 2 : Relation entre la superficie cultivée et la quantité d'azote apportée.

3.4 Irrigation manuelle et irrigation motorisée

Les valeurs ici rapportées, représentent les quantités d'eau mesurées au pompage ou au puisage manuel. Ces valeurs sont certainement supérieures aux quantités d'eau réellement reçues par la culture à cause des pertes liées au système de distribution (rendement de l'irrigation). Les quantités d'eau ont été évaluées uniquement sur la période du repiquage à la maturation du bulbe. L'eau utilisée au niveau de la pépinière n'a pas été comptabilisée. Les quantités d'eau apportées sont en moyenne de 641 mm pour l'irrigation manuelle et 755 mm pour l'irrigation à la motopompe (tableau III). Les besoins en eau de l'oignon sont estimés entre 600 à 700 mm pour la production des bulbes et jusqu'à 1200 mm pour la production des graines [6]. Pour l'irrigation motorisée, le rythme est d'un apport hebdomadaire pendant environ les 50 premiers jours suivi d'une irrigation tous les 4 à 5 jours jusqu'à la récolte. Dans le cas de l'irrigation manuelle la fréquence est plus élevée. Elle intervient tous les 3 à 4 jours pendant toute la période de croissance jusqu'à la récolte du bulbe. Il est intéressant de constater que la réduction du nombre d'irrigations chez les titulaires de motopompes est accompagnée d'une augmentation compensatrice de la dose d'irrigation. Certaines études [14], ont montré une augmentation linéaire du rendement en bulbes d'oignon avec l'augmentation de la quantité d'eau appliquée. Mais encore faut-il que toute l'eau apportée soit utilisée par la culture. Les observations sur l'humidité du sol et sur l'état hydrique du sol vont nous édifier.

Tableau III: Les paramètres d'irrigation à la base vallée de la Tarka

Irrigation	Nombre d'arrosages	Doses d'apport (mm)	Eau utilisée (mm)
Motopompe	18 ± 2	43,7 ± 9,7	755 ± 144
Mannelle	27 ± 3	23,1 ± 5,1	641 ± 135
Moyenne	22 ± 6	36,0 ± 13,2	706,0 ± 142,3

3.5 Humidité du sol

L'oignon est une culture à enracinement chevelu et superficiel avec 90% des racines se situant entre 0 et 40 cm du sol [15]. Ceci le rend très sensible à un stress hydrique. Aussi, l'irrigation optimale de l'oignon doit viser à maintenir les 50 premiers cm du sol à la capacité au champ, en limitant au maximum les pertes au-delà de cette profondeur. De ce point de vue, l'irrigation manuelle, que ce soit sur sol léger (Figure 3) ou sur sol argileux (Figure 4) s'est traduite par un meilleur état hydrique du sol ; l'humidité du sol au-dessus de 50 cm a été maintenue entre 20% et 35%. Par ailleurs, l'irrigation motorisée sur sol léger à faible capacité de rétention en eau a entraîné des pertes d'eau par drainage gravitaire attesté par l'ouverture du bas des profils hydriques (figure 5). Ces pertes sont moins importantes sur les sols argileux à grande capacité de rétention et à faible perméabilité (figure 6). Les irrigations abondantes saturent assez rapidement le profil et toutes les eaux entraînées au-delà de la zone racinaire sont perdues. L'eau de drainage gravitaire entraîne malheureusement avec elle des ions nitrates en solution qui peuvent être à l'origine de pollution de la nappe phréatique.

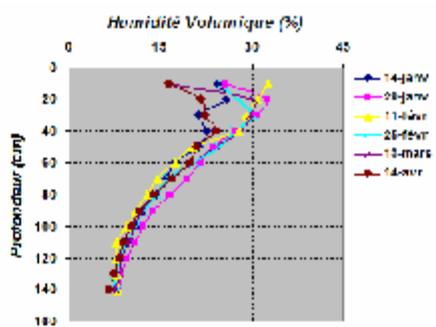


Figure 3 : Irrigation manuelle sur sol léger à faible capacité de rétention en eau.

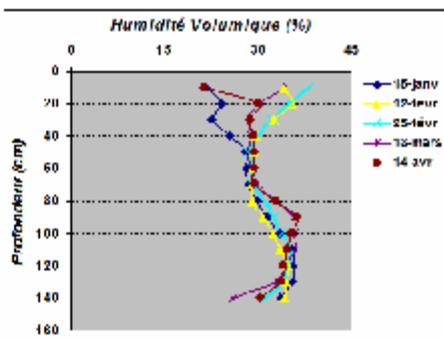


Figure 4 : Irrigation manuelle sur sol lourd à forte capacité de rétention en eau.

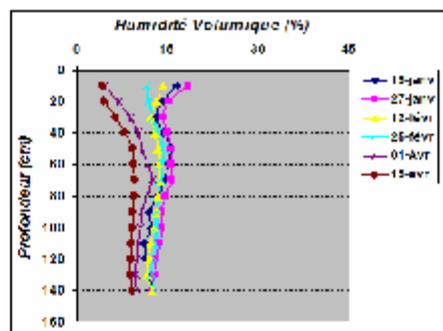


Figure 5 : Sol léger arrosé à la motopompe. Drainage visible à travers l'ouverture des courbes au bas du profil.

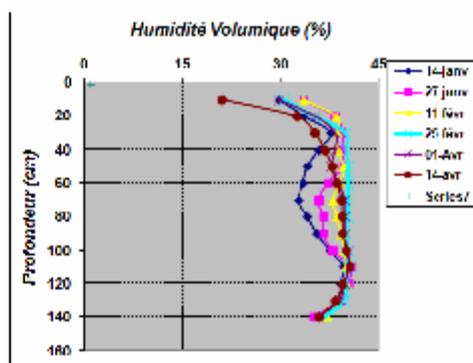


Figure 6 : Sol lourd arrosé à la motopompe. Drainage gravitaire très faible.

3.6 Tension de l'eau du sol

La tension de l'eau du sol a été mesurée à 30 et 80 cm de profondeur du sol. La première correspondant au cœur du système racinaire et la deuxième à la limite de la zone active. Ces deux profondeurs ont été choisies en tenant compte du système racinaire de l'oignon après observation du profil cultural. Le milieu de la zone d'activité racinaire maximale se situe à 30 cm. Le dessèchement poussé de cette couche indiquerait une sécheresse pour la culture. La mesure de la tension de l'eau à cette profondeur peut servir d'indicateur pour le déclenchement de l'irrigation. Au delà de 80 cm, les racines deviennent très rares et, à part les remontées capillaires, on peut considérer comme perdus, l'eau et les éléments minéraux ayant franchi cette limite. La lecture des tensiomètres à cette profondeur peut servir pour arrêter l'irrigation. D'après les observations réalisées, dans la zone racinaire active, l'énergie de rétention de l'eau est assez faible, indiquant une bonne disponibilité de l'eau pendant la première période de croissance (figure 7). Pour les sols lourds, vers la maturation du bulbe et jusqu'à la récolte, la tension va augmenter jusqu'à -160 mbars (pF 2,2). Ce résultat est conforme à ceux de Shock et al. [14] obtenus dans des conditions chaudes et sèches, comparables à celle du Niger. Ils rapportent une augmentation du rendement total quand le seuil du déclenchement de l'irrigation est fixé entre -170 et -125 mbars, à 20 cm du sol. Pour les sols légers, le niveau de tension hydrique indique que l'eau a été toujours disponible pendant toute la durée de la culture, confirmant les observations sur les humidités volumiques du sol. De même à 80 cm de profondeur, quelle que soit la texture du sol, la tension est inférieure à -50 mbars, donc l'eau restant disponible pendant toute la durée de la croissance (figure 8). Le manque d'eau durant la phase végétative n'entraîne qu'un retard de la bulbaison, alors qu'en phase critique (bulbaison) il peut entraîner une réduction de la taille moyenne des bulbes et infléchir une baisse les rendements [14, 16, 17]. Des irrigations fréquentes mais peu abondantes sont nécessaires à cette période.

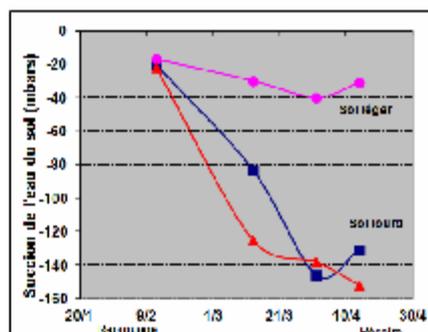


Figure 7 : Evolution de la succion de l'eau à 40 cm du sol sous une culture d'oignon

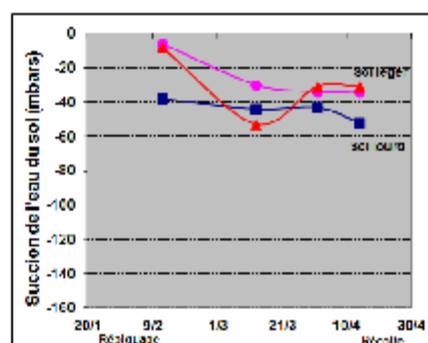


Figure 8 : Evolution de la succion de l'eau à 80 cm du sol sous une culture d'oignon

4. Conclusion

L'analyse des pratiques de l'irrigation dans la basse vallée de la Tarka montre une relative maîtrise des outils traditionnels d'arrosage. En effet, l'irrigation optimale, c'est-à-dire celle qui maintient la capacité au champ dans la zone radiculaire en limitant au maximum les pertes par percolation en profondeur a été observée chez les irrigants manuels. L'introduction de la motopompe a permis de gagner en temps et en nombre d'irrigations. La capacité de l'exploitation se trouve accrue et la mise en culture de plus grandes superficies devient possible. La notion de capacité de rétention en eau du sol est peu considérée, surtout pour les sols à textures stratifiées fréquemment observées dans les sols alluviaux hydromorphes. Ceci occasionne malheureusement des pertes considérables d'eau (et d'éléments minéraux) en profondeur pour les terres sableuses. Actuellement, le contrôle de l'irrigation est basé sur l'expérience des producteurs, sans critères techniques précis. Une bonne gestion de l'irrigation s'avère donc indispensable. L'analyse du mouvement de l'eau dans le sol en utilisant des outils d'aide à la décision d'irriguer comme les dispositifs tensio-neutroniques peut permettre de répondre aux questions des agriculteurs, à savoir quand et pendant combien de temps irriguer afin d'optimiser la productivité de l'oignon ? Ce travail fait aussi apparaître

un réel besoin de rationalisation de la fertilisation chimique au niveau de la basse vallée de la Tarka. Seul l'azote sous forme d'urée semble intéresser les agriculteurs, avec le risque accru de voir déstocker du sol les autres éléments majeurs. Seul l'azote est apporté à des doses massives pouvant atteindre 460 kg N ha⁻¹. Ces doses ont des effets dépressifs sur le rendement qui doit être probablement limité par la carence d'autres éléments majeurs ou des oligoéléments.

Malgré tout, en dépit des 50 ans que le système semble avoir perduré, les rendements mesurés restent acceptables. Le processus de maintien de la fertilité doit être élucidé. L'implication des apports massifs en azote minéral doit être étudiée quant à ses conséquences à long terme sur l'environnement immédiat. On remarque que dans tous les cas, les conditions d'atteinte à la qualité des eaux de la nappe phréatique (réservoir d'eau pour l'irrigation) sont réunies : fumure très élevée, drainage pauvre, arrosages fréquents et sol léger. L'avenir de la filière oignon au Niger dépend de la prise en compte de la protection de l'environnement tel que démontré par Boukay et al. [18]. La variabilité observée sur les différents caractères était attribuée pour une large part à la nature du sol et aux conditions climatiques.

Références Bibliographiques

1. FAO : Systèmes d'exploitation agricoles et pauvreté. Documents internes de la FAO (2000).
2. WUR-CDI, SNV-Niger, FCMN-Niya et Agri-Bilan : Eplucher l'oignon "L'importance de l'oignon dans la vie socio-économique du Niger: Contexte et Agenda d'actions ", Projet de recherche-action (2011) ;
www.snvworld.org/sites/www...org/_/eplucher_oignon_v28212_0.pdf
3. LEFEVRE F. : Sous le sable, l'eau (2001). *Le Courrier*, ACP-UE, juillet-Août 2001
4. TARCHIANI V., ROBBIATI G. et SALIFOU M. R.: Filières oignon en Afrique de l'Ouest: Etude comparée des filières nigérienne et béninoise. *Cah. Agric* ; (2013), vol. 22, n°8 (2), mars-avril 2013.
5. Danlamso N. et Guéro Y.: Irrigation et fertilisation dans la Basse vallée de la Tarka. Rapport d'activité ; *Recherche d'Accompagnement*; (1999), Projet Basse Vallée de la Tarka.
6. MESSIAENC.M. : Les Allium. Dans : *Le potager Tropical*. Tome III : Cultures spéciales Coll. Techniques vivantes, *Presses Universitaires de France*; (1975) p 495-516
7. FRITSCHI F.B., BRUCE A.R., RAINSC D. W., TRAVISC R.L. and HUTMACHERD R. B. : Fate of Nitrogen-15 Applied to Irrigated Acala and Pima Cotton. *In Agron. J.* ; (2004) 96:646-655
8. HUBBARD R.K. and SHERIDAN JM. : Retention of solutes by clayed coastal plain soils. *J. Soil Water Conserv.* ; (1994) 49 : 90-96
9. JIAO Y., HENDERSHOT W. H. and WHALEN J. K. : Agricultural Practices Influence Dissolved Nutrients Leaching through Intact Soil Cores. *In Soil Sci. Soc. Am. J.* ; (2004) 68:2058-2068
10. GEHL R. J., SCHMIDT J. P., STONE L. R., SCHLEGEL A. J. and CLARK G. A. : In Situ Measurements of Nitrate Leaching Implicate Poor Nitrogen and Irrigation Management on Sandy Soils. *In J. Environ. Qual.*; (2005) 34: 2243-2254
11. ZHANG Z., ZHU Y.M., GUO P.Y. and LIU G.S. : Potential Loss of Phosphorus from a Rice Field in Taihu Lake Basin. *In J. Environ. Qual.* (2004) 33:1403-1412

12. SEGDA Z., HAEFELE S.M., WOPEREIS M. C. S., SEDOGO M. P. and GUINKO S. : Agro-Economic Characterization of Rice Production in a Typical Irrigation Scheme in Burkina Faso. *in Agron. J.* ; (2004) 96:1314-1322
13. SEGDA Z., HAEFELE S. M., WOPEREIS M. C. S., SEDOGO M. P. and GUINKO S. : Combining Field and Simulation Studies to Improve Fertilizer Recommendations for Irrigated Rice in Burkina Faso (2005). *Agron J* 97:1429-1437 (2005)
14. SHOCK C.C., FEIBERT E.B.G. and SAUNDERS L.D. : Onion yield and quality affected by soil water potential as irrigation threshold. *Hort. Sci.* ; (1998) 33 1181-1191
15. GREENWOOD D.J., GERWITZ A., STONE D.A. and BARNES A. : Root development of vegetable crops. *Plant and Soil* ; (1982) 68 : 75-96
16. LEBLANC M. : Oignon espagnol : Guide de production (2004). [www.agrireseau.qc.ca/legumes de champ/documents](http://www.agrireseau.qc.ca/legumes_de_champ/documents)
17. PELTER G.Q., MITTELSTADT R., LEIB B.G. and REDULLA C.A.: Effects of water stress at specific growth stages on onion bulb yield and quality. *Agricultural water management*; (2004) 68, 107-115
18. BOUKARY H., ROUMBA A., ADAM T., BARAGE M. et SAADOU M. : Interactions entre la variabilité des écotypes de l'oignon (*Allium cepa* L.) et les facteurs agro-climatiques au Niger. *TROPICULTURA*; (2012) 30, 4, 209-215

2.5. Valorisation du Phosphate naturel de Tahoua

La carence des sols nigériens en phosphore est l'un des handicaps majeurs à la croissance de la production alimentaire et l'équilibre nutritionnel des populations. Le phosphate industriel entièrement soluble est de plus en plus cher, surtout pour des pays entièrement enclavés comme le Niger. La rentabilité agricole est assujettie à des apports d'engrais qui se font de plus en plus massivement. La pauvreté des agriculteurs et la rareté du crédit agricole sont tels que l'agriculteur n'est capable d'aucun investissement, même pas celui de se procurer l'engrais nécessaire au maintien de la fertilité des sols. La recherche de la valorisation des phosphates naturels dont le Niger a l'une des plus grandes réserves de l'Afrique de l'Ouest peut contribuer à solutionner ce problème. Les analyses minéralogiques et chimiques ne classent pas le phosphate naturel de Tahoua (TRP) dans la catégorie des phosphates tendres, et son utilisation directe en agriculture est présentée comme hasardeuse. La pauvreté en P assimilable (8 à 12 ppm P Olsen) des sols sableux du Niger et la sensibilité du mil à la fertilité phosphorique donnent quelques espoirs à la recherche surtout sur des sols acides et pour des plantes au système racinaire adapté (dense et acidifiant). Bien que la caractérisation de la fertilité phosphatée des sols nigériens ait été l'objet de nombreuses études, il manque encore une analyse détaillée sur le devenir, à court, moyen et long terme du phosphore de l'engrais appliqué aux sols sableux dunaires. Le but de ce travail est, d'une part de déterminer la valeur agronomique du TRP, dans le sens de sa participation à la nutrition phosphatée de l'une des plus importantes cultures nigériennes, et d'autre part de préciser le devenir du phosphore d'un engrais soluble la première année de son application. Les résultats montrent que la participation du phosphate naturel à la nutrition phosphatée pour les cultures de mil et de niébé est de l'ordre de 10% et 20% respectivement. Ceci implique que l'utilisation directe du phosphate naturel de Tahoua comme fertilisation phosphatée sur les sols sableux dunaires du Niger est surtout envisageable pour le niébé. Plus de 84% de l'engrais apporté au sol reste non utilisé par la plante la première année de l'application et que 80% du phosphore de la plante provient du sol, qui restent la principale source de phosphore pour la plante malgré leur extrême pauvreté en phosphore. L'ensemble des résultats a permis de situer le devenir du phosphore apporté par les deux types d'engrais, et de souligner des éléments de réflexion pour une meilleure gestion à plus long terme de la stratégie de fertilisation phosphatée en sols à texture sableuse.

Ce travail a été publié dans les *Annales de l'Université Abdou Moumouni*, Tome XVI-A, pp 104-117, Septembre 2014 **Daouda Ousmane S. (2014). Evaluation de l'Application**

Directe du Phosphate Naturel de Tahoua, Seul ou mixé avec une Engrais Soluble, en utilisant la Technique du Marquage Isotopique au ^{32}P

Evaluation de l'application directe du phosphate naturel de Tahoua, seul ou mixé avec un engrais soluble, en utilisant la technique du marquage isotopique au ^{32}P .

Daouda Ousmane S^{*},

Institut des Radio-Isotopes, Université Abdou Moumouni, BP 10 727 Niamey Niger.

*Auteur correspondant : dsaniri@yahoo.fr

Résumé : Les sols tropicaux sont souvent pauvres en phosphore biodisponible et nécessitent donc des apports sous forme d'engrais pour la croissance optimale des cultures. Avec le niébé en association, le mil est la principale culture servant de base alimentaire pour des millions de personnes au Sahel. La culture se fait sur des sols dunaires de faible capacité de rétention en eau et en éléments minéraux, favorables au drainage et à la lixiviation en profondeur. Aussi, la rentabilité agricole est assujettie à des apports d'engrais qui se font de plus en plus massivement. C'est ainsi que, pour prévenir les risques d'impacts environnementaux négatifs, des recherches ont été entreprises sur un sol ferrugineux tropical à texture sableuse pour préciser, sur un système de cultures de mil-niébé, le coefficient réel d'utilisation de l'engrais chimique soluble comme celui du phosphate naturel, et la valeur agronomique relative du phosphate naturel de Tahoua (TRP). Les résultats montrent que la participation du phosphate naturel à la nutrition phosphatée pour les cultures de mil et de niébé est de l'ordre de 10% et 20% respectivement. Ceci fait dire que l'utilisation directe du phosphate naturel de Tahoua comme fertilisation phosphatée sur les sols sableux dunaires du Niger est surtout envisageable pour le niébé. Plus de 84% de l'engrais apporté au sol reste non utilisé par la plante la première année de l'application et que 80% du phosphore de la plante provient du sol, qui restent la principale source de phosphore pour la plante malgré leur extrême pauvreté en phosphore. L'ensemble des résultats a permis de situer le devenir du Phosphore apporté par les deux types d'engrais, et de souligner des éléments de réflexion pour une meilleure gestion à plus long terme de la stratégie de fertilisation phosphatée en sols à texture sableuse.

Mots clé: Fertilisation, Phosphore, Marquage Isotopique, Mil, Niébé

The evaluation of direct application of natural phosphate rock of Tahoua, alone or mixed with a soluble fertilizer by using the isotopic labeling technique with ^{32}P .

Abstract: Tropical soils are often low in available phosphorus and therefore require fertilizers input for optimum crop growth. In association with cowpea, millet is the main staple crop for millions of people in the Sahel. Millet and cowpea production is done in soils with low water holding capacity, favorable for nutrient leaching and fertilizers losses. Also, farm profitability is subject to the use of fertilizers with increasing tendency. Thus, to prevent the risk of environmental impact, research has been undertaken on a tropical ferruginous sandy soil, to determine the fertilizer use efficiency and agronomic value of the natural rock phosphate of Tahoua TRP. Results showed that Tahoua rock phosphate contribute to millet and cowpea phosphorus nutrition at 10% and 20% respectively, indicating possible direct use of TRP

preferentially for cowpea. More than 84% of applied fertilizer was not used by plant, the first year of application, and 80% of plant phosphorus came from soil. Even the soil has very poor phosphorus fertility, it stays the first source for plant nutrition. Results permitted to define the fate of Phosphorus provided by both types of fertilizer, but also to give indicators to manage longer-term strategy of P fertilization of these crops in soils sandy texture.

Keywords: Fertilizer, Phosphorus, Isotope Labeling, Millet, Cowpea

1. Introduction

La carence des sols nigériens en phosphore est l'un des handicaps majeurs à la croissance de la production alimentaire et l'équilibre nutritionnel des populations [1, 2]. Le phosphate industriel entièrement soluble est de plus en plus cher, surtout pour des pays entièrement enclavés comme le Niger. La pauvreté des agriculteurs et la rareté du crédit agricole sont tels que l'agriculteur n'est capable d'aucun investissement, même pas celui de se procurer l'engrais nécessaire au maintien de la fertilité des sols. La recherche de la valorisation des phosphates naturels dont le Niger a l'une des plus grandes réserves de l'Afrique de l'Ouest peut contribuer à solutionner ce problème. Les analyses minéralogiques et chimiques ne classent pas le phosphate naturel de Tahoua (TRP) dans la catégorie des phosphates tendres [3], et son utilisation directe en agriculture est présentée comme hasardeuse. La pauvreté en P assimilable (8 à 12 ppm P Olsen) des sols sableux du Niger et la sensibilité du mil à la fertilité phosphorique donnent quelques espoirs à la recherche surtout sur des sols acides et pour des plantes au système racinaire adapté (dense et acidifiant). Cependant, au stade actuel, la rentabilité agricole est assujettie à des apports d'engrais qui se font de plus en plus massivement. La faible capacité de sorption du P des sols dunaires du Niger et leur faible rétention en eau, déterminent un risque élevé d'impacts environnementaux négatifs. Bien que la caractérisation de la fertilité phosphatée des sols nigériens a été l'objet de nombreuses études [1, 2, 4, 5, 6], il manque encore une analyse détaillée sur le devenir, à court, moyen et long terme du phosphore de l'engrais appliqué aux sols sableux dunaires. Le but de ce travail est, d'une part de déterminer la valeur agronomique du TRP, dans le sens de sa participation à la nutrition phosphorique de l'une des plus importantes cultures nigériennes, et d'autre part de préciser le devenir du phosphore d'un engrais soluble la première année de son application.

2. Matériels et méthodes

2.1. Description du site expérimental

Le terrain de l'essai est une parcelle expérimentale de l'Institut des Radio-Isotopes (IRI) à l'Université Abdou Moumouni de Niamey au Niger. Il s'agit d'une terre cultivée en mil, souvent associé au niébé, en condition d'apport minéral très modéré. En 2007, un apport d'un fumier dosant 0,15% de P_2O_5 , à la dose de 10 t par hectare a été effectué. Le terrain est un sol

ferrugineux tropical sur sable dunaire, peu évolué, peu lessivé et désaturé, pauvre en éléments fins et en matière organique [7]. Les analyses pédologiques réalisées au Laboratoire de fertilité des sols de l'IRI ont révélé, sur les 50 premiers cm du sol (Tableau I), une dominance de sable (96,3%), très peu de matière organique (0,09 ‰) et une très faible capacité d'échange cationique (1,3 meq/100g de sol), une faible teneur en phosphore assimilable (P_2O_5 Olsen : $0,88 \text{ mg kg}^{-1}$) et un pH légèrement acide. Le sol est profond, mais de faible capacité de rétention en eau ($0,08$ à $1,12 \text{ cm}^3/\text{cm}^3$) entre 0 et 1 mètre de profondeur [8].

Tableau I: Caractéristiques physico-chimiques du sol. A: Argiles; Lf: limons fins; Lg: Limons grossiers; Sf: Sables fins; Dg: Sables grossiers

Prof. (cm)	Granulométrie (%)	MO	Humidité	pH P	N	Eléments échangeables	CEC	
	A Lf Lg Sf Sg	(%)	équiv.(%)	ppm	%	meq/100g		meq/100g
			(1000g)			Ca ⁺⁺ Na ⁺ Mg ⁺⁺ K ⁺		
0-50	1,7 1,0 1,0 23,0 73,3	0,14	1,9	6,0 88	0,09	0,7 0,02 0,22 0,13	1,3	
50-150	4,8 1,1 1,1 26,6 66,4	0,08	3,7	5,9 70	0,08	1,3 0,02 0,41 0,13	1,9	
150-250	6,9 0,9 1,5 28,3 62,5	0,07	5,3	6,1 62	0,07	1,7 0,03 0,79 0,21	2,6	

La pluviométrie a été mesurée à l'aide d'un pluviomètre à lecture directe installé à proximité de la parcelle expérimentale, à 1,5 mètre du sol. Le cumul pluviométrique de l'année 2009 est de 491 mm, reparti en 36 jours de pluie et avec plus de 300 mm pour les seuls mois de Juillet et Août (Tableau II). Ceci est souvent à l'origine d'abondants drainages en profondeur qui peuvent rendre considérables les pertes d'éléments nutritifs, en particulier sur les sols sableux.

Tableau II: hauteurs pluviométriques (mm) de l'année 2009

Décades	Avril	Mai	Juin	Juillet	Août	Septembre	Octobre	Total an
1	0	0	20,5	15,0	45,0	45,0	0,0	
2	0	0	37,5	26,5	130,0	23,0	23,0	
3	2,5	13,0	2,5	87,0	25,0	2,0	2,0	
Total Mois	2,5	15,5	60,5	129,0	185,0	70,0	31,0	491,0
jours de pluie	1	2	5	10	9	7	2	36

2.2. Dispositif expérimental et traitements

Il a été mis en place en 2009. Il s'agit d'une parcelle d'environ $2\ 500 \text{ m}^2$, répartie en 30 parcelles élémentaires de $6 \text{ m} \times 7,5 \text{ m}$. Deux sources de phosphore sont comparées. Le phosphate naturel de Tahoua (TRP) et un phosphate entièrement soluble dans l'eau, le super simple phosphate (SSP). Le TRP a une teneur en P_2O_5 de 26%, mais est très peu soluble dans l'eau (0,1%). Le SSP a une teneur en P_2O_5 de 20%. Il y a en tout six traitements (Tableau III).

Le SSP est apporté à la dose annuelle de 8,8 kg P ha⁻¹ (SSPa), ou mélangé avec du phosphate Naturel de Tahoua aux doses respectives de 8,8 kg P ha⁻¹ et 4,4 kg P ha⁻¹ (Mixte). Le Phosphate naturel de Tahoua est apporté à la dose annuelle de 8,8 kg P ha⁻¹ (TRPa) ou sous forme d'apport de fond à la dose de 35,5 kg P ha⁻¹ (TRPf). Ces quatre apports sont comparés à un témoin absolu sans apport et à un témoin dit "azoté" qui a reçu un apport d'engrais azoté équivalent à la dose de 46 kg N ha⁻¹. A part le témoin absolu, tous les traitements ont reçu chacun un apport de 46 kg N ha⁻¹. Les traitements sont répétés 5 fois. Les engrais phosphatés ont été apportés au sol avant le semis, à la volée et immédiatement incorporés par un labour croisé, à la daba de 5 à 15 cm de profondeur. Les parcelles élémentaires font 6 m x 7,5 m chacune, et sont séparées par des allées de 2 m de large. Un marquage isotopique au ³²P a été fait sur les parcelles ayant reçu comme traitement le SSPa et le Mixte. Le marquage a été fait sur des microparcelles de 2,25 m² délimitées au milieu de chaque parcelle élémentaire. Les microparcelles reçoivent l'engrais marqué à la même dose de P que le reste de la parcelle. L'engrais marqué a une radioactivité spécifique de 6,5 mCi par gramme de P. Les analyses isotopiques et chimiques pour le bilan du phosphore ont été faites uniquement sur les traitements marqués au ³²P, c'est-à-dire sur SSPa et SSPa+TRP (Mixte). Les analyses statistiques pour les comparaisons des moyennes sont faites selon le test du t de Student au seuil de probabilité de 0,05.

2.3. Matériel végétal

La variété de mil choisie est le *Hāimi Kiré Précoce (HKP)*, à cycle moyen de 85-90 jours et qui s'adapte aux pluviométries moyennes de 300 à 450 mm [9]. Le nébé est la *TNS-78*, une variété locale à port rampant. Elle est tolérante à la sécheresse et montre un rendement stable et régulier, caractéristiques qui lui valent sa vulgarisation au Niger.

Tableau III : Les doses d'apport en P et N (en kg ha⁻¹), et les formes d'engrais phosphaté correspondant aux différents traitements.

Traitements	Super simple	Phosphate naturel	Azote
CTR	0	0	0
AZT	0	0	46
SSPa	8,8	0	46
TRPa	0	8,8	46
MIX	8,8	4,4	46
TRPf	0	35,2	46

CTR: Témoin Absolu sans apport; *AZT*: Témoin avec apport d'azote; *SSPa*: Super Simple Phosphate en apport annuel; *TRPa*: Phosphate Naturel de Tahoua en apport annuel; *Mix*: SSP + TRP; *TRPf*: Phosphate naturel de Tahoua en apport de fond.

2.4. Déroulement de la culture

Le mil a été semé avec un écartement de 1,5 m x 0,75 m soit 8 889 poquets ha⁻¹. Le semis est manuel. Les graines (10 à 20 par poquet) sont enterrées à environ 5 à 10 cm de profondeur. Le semis a eu lieu le 06 Juin 2009 après une pluie de 20 mm. Le phosphore a été apporté avant le semis, aux doses respectives, suivant le traitement. Les microparcelles ont reçu l'engrais

marqué aux mêmes doses. L'azote a été apporté plus tard, moitié au tallage et moitié à la montaison, à la dose totale de 46 kg N ha⁻¹ en forme de cercle autour des pieds de mil et immédiatement incorporé par un léger scarifiage. Il n'y a pas eu d'apport de potassium. Le niébé a été semé, entre les rangs de mil, à la densité de 17 778 poquets ha⁻¹ à raison de 3 graines par poquet, 14 jours après le semis du mil. Le niébé a reçu le même apport phosphaté que le mil mais n'a reçu ni azote ni potassium.

2.5. Déterminations analytiques

Matière sèche aérienne

La matière sèche est estimée à la récolte sur les placettes de rendement. Ces placettes sont constituées de 10 poquets choisis au hasard avant le semis sur les rangs du milieu. Chaque parcelle élémentaire (répétition) comporte une placette de rendement. La matière sèche est estimée de la même manière sur le mil et sur le niébé. Le poquet est intégralement récolté et reparti entre tiges et feuilles d'une part et épis d'autre part. Pour le niébé, il est reparti entre fanes et gousses. La matière sèche est pesée après passage à l'étuve à 80°C pendant 48 heures. Les poquets des micro-parcelles marquées sont destinés à la détermination de la radioactivité dans les parties aériennes..

Analyse du phosphore total et du phosphore 32 dans la plante

La détermination est faite sur un échantillon de 2 g de matière sèche minéralisée au four à moufle à 550°C pendant environ 5 heures et récupérée dans 10 ml d'acide nitrique dilué à 10%. Le dosage du phosphore se fait sur le filtrat. Le phosphore total exporté est obtenu par dosage colorimétrique au "vanado-molybdate", après calcination de la matière sèche puis reprise des cendres en milieu acide. Le phosphore 32 est déterminé sur 10 ml par effet Cerenkov.

Traitement des données et expression des résultats

L'objectif est la détermination de la fraction de l'engrais apporté qui est réellement exportée par la plante. C'est le *Coefficient Réel d'Utilisation (CRU)* de l'engrais. Si la quantité de radioactivité dans l'engrais est R et que la quantité de radioactivité dans la plante est r , le CRU a pour valeur :

$$CRU\% = \frac{r}{R} 100$$

Il a également été déterminé, dans la plante, la fraction de phosphore originaire de l'engrais. C'est le *phosphore dérivé de l'engrais Pdff*. Si P_{pl} désigne le phosphore total provenant de la plante, ce phosphore vient de deux sources : le phosphore du sol P_s et le phosphore provenant de l'engrais P_e . On a :

$$P_{pl} = P_s + P_e$$

$$Pdff\% = \frac{P_e}{P_{pt}} 100 = \frac{P_e}{(P_e + P_s)} 100$$

P_e est obtenu à partir du CRU. Soit Q la quantité d'engrais apportée. On a :

$$P_e = Q CRU = Q \frac{r}{R}$$

$$Pdff\% = \frac{Q r/R}{P_{pt}} 100$$

Le P de la plante dérivé du TRP est selon Fried [10, 11] et Zapata [12] :

$$Pdr\% = \left(1 - \frac{RAS_{pt}(avec TRP)}{RAS_{pt}(sans TRP)}\right) 100$$

Où RAS_{pt} est la Radio-activité spécifique dans la plante

3. Résultats

3.1. Matière sèche

Les productions moyennes de matière sèche ont été reportées au Tableau IV. Elles varient de 1670,3 à 2285,3 kg ha⁻¹, pour les épis de mil, et de 2481,6 à 3793,7 kg ha⁻¹ pour les tiges de mil. Pour le niébé, elles varient de 236,5 à 366,9 kg ha⁻¹ de gousses et de 586,4 à 984,7 kg ha⁻¹ de fanes. Ces productions sont nettement plus élevées que les rendements traditionnellement obtenus en milieu paysan, chez les agriculteurs nigériens; en moyenne, 400 kg de grains pour le mil et 100 kg de grains pour le niébé [13]. En revanche, ils sont comparables à ceux obtenus dans les essais agronomiques en conditions sahéliennes [6, 14, 15, 16]. Le contrôle absolu, n'ayant reçu aucune fertilisation a tout de même produit une tonne de grains de mil à l'hectare. Ceci indique une certaine fertilité du sol qu'on peut rapprocher de l'apport antérieur d'amendement organique en 2007, deux années avant l'essai. L'analyse statistique (Tableau V) montre que l'apport de phosphore sous forme soluble SSPa à la dose de 8,8 kg P ha⁻¹, ou associé avec du Phosphate naturel de Tahoua à la dose de 4,4 kg P ha⁻¹ (Mixte), de même que le phosphate naturel de Tahoua à la dose de 35,5 kg P ha⁻¹, ont entraîné significativement une augmentation de la production de mil. Aucune différence significative entre les traitements n'a été obtenue dans le cas du niébé.

3.2. P total exporté par la plante

La détermination des CRU, Pdff et Pdfs nécessite le marquage isotopique. C'est pourquoi l'analyse du phosphore a été poursuivie uniquement sur les deux traitements ayant reçu les engrais marqués ; les traitements SSPa et Mixte. Les teneurs en phosphore des parties aériennes mesurées sur notre expérimentation sont d'environ 1⁰/₀₀ pour les grains de mil et 0,5⁰/₀₀ pour les tiges de mil et légèrement plus élevées pour le niébé (Tableau VI). Le

phosphore total exporté varie de 3,96 à 4,45 kg P ha⁻¹ pour le mil et de 0,66 à 1,08 kg P ha⁻¹ pour le niébé soit 4,62 à 5,54 kg P ha⁻¹ pour l'association mil-niébé. Il n'y a pas de différence significative entre les deux traitements, SSPa et Mixte, malgré une augmentation de 33% du P total au sol apporté par le mélange SSP + TRP par rapport au SSP seul. Cette différence n'a pas été suffisante pour modifier le niveau d'exportation total de P par la culture associée de mil et niébé, surtout que le phosphate naturel de Tahoua est de très faible solubilité (0,1% dans l'eau).

Tableau IV: Matière sèche aérienne récoltée (en kgha⁻¹) en fin de cycle, répartie entre tiges et épis pour le mil et entre fanes et gousses pour le niébé.

Traitements	Epis	Tiges	Gousses	Fanes
Contrôle	1670,3	2481,6	346,2	732,4
Azote	2022,0	3352,0	366,9	811,8
SSPa	2249,3	3303,7	361,7	738,6
TRPa	1920,4	2740,5	331,4	984,7
Mixte	2285,3	3793,7	257,3	586,4
TRPf	2085,2	2539,9	236,5	635,5

Tableau V : probabilités d'inégalité des moyennes des masses des épis et des tiges, obtenues selon le test de t de Student.

	Controle	Azote	SSPa	Mixte	TRPa	TRPf
Controle						
Epi		0,171	0,025**	0,012**	0,221	0,028**
Tige		0,197	0,136	0,026**	0,572	0,894
Azote						
Epi			0,373	0,271	0,633	0,418
Tige			0,936	0,465	0,290	0,163
SSPa						
Epi				0,852	0,113	0,912
Tige				0,297	0,188	0,076*
Mixte						
Epi					0,055*	0,757
Tige					0,023**	0,008**
TRPa						
Epi						0,132
Tige						0,519
TRPf						
Epi						
Tige						

** significatif au seuil de 5%, * significatif au seuil de 10%.

Tableau VI: Exportation en P par la culture associée de mil-niébé

	P ⁰ /100		MS (t ha ⁻¹)		P total (KgPha ⁻¹)	
	SSPa	SSP+TRP	SSPa	SSP+TRP	SSPa	SSP+TRP
Mil						
Epi	1,10	0,93	2,25	2,29	2,46	2,13
Tige	0,60	0,48	3,30	3,79	1,99	1,83
Total			5,55	6,08	4,45	3,96
Niébé						
Gousse	1,51	1,53	0,36	0,26	0,55	0,39
Fane	0,73	0,45	0,74	0,59	0,54	0,27
Total			1,10	0,84	1,09	0,66
Total Mil-Niébé					5,54	4,62

3.3. Les Coefficients Réels d'Utilisation de l'engrais

Pour la culture du mil, les CRU obtenus sont de 11,1% et 7,8% respectivement pour le SSPa et le Mixte (Tableau VII). Ils sont plus faibles chez le niébé; 4,2% et 0,8% respectivement. Soit un total de 15,3% et 8,6% pour les deux cultures associées. Les analyses statistiques montrent que, dans tous les cas, le CRU est significativement plus élevé avec le traitement SSPa. Le mélange avec le phosphate naturel s'est traduit par une réduction sensible de l'utilisation par la plante du phosphore de l'engrais soluble. Avec 0,8% de CRU dans le cas du Mixte, le niébé apparaît comme un bon valorisateur des phosphates naturels, étant donné que les rendements en matière sèche restent comparables entre les deux traitements. L'apport de phosphate naturel de Tahoua a contribué à la nutrition phosphatée de la plante, sans réduction de la productivité. Il ressort que le phosphate naturel de Tahoua, appliqué sous la forme brute, possède une certaine efficacité agronomique observable la première année de son application. L'apport du phosphate naturel a entraîné la réduction du niveau de l'utilisation du P de l'engrais soluble SSP de 44%, et ceci sans modifier significativement les rendements en matière sèche. Globalement, plus de 84% de l'engrais apporté n'a pas été utilisé par la culture la première année de son application.

3.4. Le phosphore de la plante originaire de diverses sources de P :

Le phosphore de la plante, provenant de l'engrais soluble est de 20,9% et 18,4% pour la culture de mil, et de 19,2% et 17,1% pour la culture de niébé, respectivement pour les traitements SSPa et Mixte (Tableau VIII). Il n'y a pas de différence significative entre les traitements. L'apport de phosphate naturel de Tahoua, tout en réduisant le CRU, ne change pas significativement la proportion des phosphores de la plante entre le sol et les engrais. La portion du phosphore de la plante en provenance du sol restent globalement autour de 80%. Cependant, de la proportion du P du Mixte, 10% proviennent du phosphate naturel pour le mil et jusqu'à 20% pour le niébé. Le niébé valorise bien les phosphates naturels.

Tableau VII: Coefficients réels d'utilisation d'un engrais soluble, seul (SSP) et mélangé au phosphate naturel de Tahoua (Mixte), par une culture associée de mil et niébé. Les coefficients de variation sont entre parenthèse.

	CRU%		
	SSP	Mixte	Probabilité
Mil	11,1 (31%)	7,8 (36%)	0,031
Niébé	4,2 (27%)	0,8 (80%)	0,011
Total	15,3 (29%)	8,6 (37%)	0,025

Tableau VIII : Phosphore de la plante originaire de diverses sources ; de l'engrais (Pdff), du sol (Pdfs) ou du phosphate naturel (Pdfr).

	Pdff%		Pdfs		PdfT%
	SSP	Mixte	SSP	Mixte	
Mil	20,9 (29%)	18,4 (45%)	79,1	81,6	10,1 (174%)
Niébé	19,2 (29%)	17,1 (24%)	80,8	82,9	20,6 (114%)

4. Discussion

Il ressort que l'apport de l'azote seul n'a pas entraîné d'augmentation significative de production de grain de mil ainsi que de matière sèche totale par rapport au témoin absolu. Ceci indique que le niveau de l'azote, malgré qu'il soit faible, n'est pas le premier facteur limitant de notre sol d'essai. Plusieurs études antérieures [3, 1, 4] ont déjà souligné que le phosphore reste encore l'un des plus grands obstacles à la production agricole en Afrique tropicale. Le phosphore soluble en apport seul (SSPa) ou mélangé avec du phosphate naturel (Mixte), à la dose de 8,8 kg P ha⁻¹, a entraîné une augmentation significative du rendement en grain et en matière sèche totale. L'effet du phosphore soluble sur les rendements grains chez le mil est un résultat abondamment reporté par les travaux antérieurs [4, 6, 13]. En revanche, l'application du phosphate naturel de Tahoua, à la dose de 8,8 kg P par hectare, n'a pas été suffisante pour induire une augmentation de rendement de mil et du niébé. Cependant, une augmentation significative du rendement en épis de mil a été observée à la dose de 35,2 kg P par hectare. Les travaux antérieurs sur la valorisation des phosphates naturels ont rapporté une efficacité agronomique pouvant aller jusqu'à 75% par rapport à l'engrais soluble TSP [3, 6]. La plupart de ces travaux ont effectivement appliqué des doses fortes, supérieures à l'équivalent de 50 kg P ha⁻¹ (supérieures à 200 kg de phosphate naturel à l'hectare). L'effet des phosphates naturels est surtout apprécié comme arrière effet, plusieurs années à la suite après l'application, mais aussi et surtout pour son rôle favorable sur le relèvement du pH des sols acides et du niveau du magnésium et du calcium échangeable [17].

Les teneurs en phosphore des parties aériennes mesurées sur l'expérimentation sont d'environ

Tableau VII: Coefficients réels d'utilisation d'un engrais soluble, seul (SSP) et mélangé au phosphate naturel de Tahoua (Mixte), par une culture associée de mil et niébé. Les coefficients de variation sont entre parenthèse.

	CRU%		
	SSP	Mixte	Probabilité
Mil	11,1 (31%)	7,8 (36%)	0,031
Niébé	4,2 (27%)	0,8 (80%)	0,011
Total	15,3 (29%)	8,6 (37%)	0,025

Tableau VIII : Phosphore de la plante originaire de diverses sources ; de l'engrais (Pdff), du sol (Pdfs) ou du phosphate naturel (PdfT).

	Pdff%		Pdfs		PdfT%
	SSP	Mixte	SSP	Mixte	
Mil	20,9 (29%)	18,4 (45%)	79,1	81,6	10,1 (174%)
Niébé	19,2 (29%)	17,1 (24%)	80,8	82,9	20,6 (114%)

4. Discussion

Il ressort que l'apport de l'azote seul n'a pas entraîné d'augmentation significative de production de grain de mil ainsi que de matière sèche totale par rapport au témoin absolu. Ceci indique que le niveau de l'azote, malgré qu'il soit faible, n'est pas le premier facteur limitant de notre sol d'essai. Plusieurs études antérieures [3, 1, 4] ont déjà souligné que le phosphore reste encore l'un des plus grands obstacles à la production agricole en Afrique tropicale. Le phosphore soluble en apport seul (SSPa) ou mélangé avec du phosphate naturel (Mixte), à la dose de 8,8 kg P ha⁻¹, a entraîné une augmentation significative du rendement en grain et en matière sèche totale. L'effet du phosphore soluble sur les rendements grains chez le mil est un résultat abondamment reporté par les travaux antérieurs [4, 6, 13]. En revanche, l'application du phosphate naturel de Tahoua, à la dose de 8,8 kg P par hectare, n'a pas été suffisante pour induire une augmentation de rendement de mil et du niébé. Cependant, une augmentation significative du rendement en épis de mil a été observée à la dose de 35,2 kg P par hectare. Les travaux antérieurs sur la valorisation des phosphates naturels ont rapporté une efficacité agronomique pouvant aller jusqu'à 75% par rapport à l'engrais soluble TSP [3, 6]. La plupart de ces travaux ont effectivement appliqué des doses fortes, supérieures à l'équivalent de 50 kg P ha⁻¹ (supérieures à 200 kg de phosphate naturel à l'hectare). L'effet des phosphates naturels est surtout apprécié comme arrière effet, plusieurs années à la suite après l'application, mais aussi et surtout pour son rôle favorable sur le relèvement du pH des sols acides et du niveau du magnésium et du calcium échangeable [17].

Les teneurs en phosphore des parties aériennes mesurées sur l'expérimentation sont d'environ

1⁰/₀₀ pour les grains de mil et 0,5⁰/₀₀ pour les tiges de mil et légèrement plus élevées pour le niébé. Il n'a pas été observé de différence significative entre les traitements SSPa et Mixte, dans l'exportation totale de P par la culture associée mil-niébé. Muchlig-Versen et al. [15] ont obtenu une exportation de 3,4 kg P ha⁻¹ sur le sol sans apport d'engrais phosphaté et 8,8 kg P ha⁻¹ avec un apport de 13 kg P ha⁻¹ de Super triple Phosphate. La teneur en phosphore de la partie aérienne est dépendante des conditions de croissance, notamment l'humidité du sol et la disponibilité des autres éléments minéraux du sol. Dans l'expérience de Muchlig-Versen [15], un apport supplémentaire de 13 kg P ha⁻¹ a fait passer la teneur en P des grains de mil de 2,6⁰/₀₀ sur le témoin sans apport à 3,2⁰/₀₀. Le sol sur lequel s'est déroulé l'expérimentation et qui représente bien la catégorie des sols cultivés en mil au Niger, est un sol sableux, presque sans matière organique, de faibles capacités de rétention en eau et en éléments minéraux, de sorte qu'il y a toujours un élément nutritif limitant, dès que le niveau d'un autre est remonté à l'optimum par application d'un engrais. Ceci peut expliquer la faiblesse de la réponse du phosphore qui a été observée. En revanche, dans un autre cas, le phosphore total annuellement exporté par une rotation maïs-niébé a été estimé à 7,3 kg par hectare [18]. Cette quantité n'a pas été modifiée par un apport supplémentaire de 60 kg P par hectare pour un sol dont la teneur initiale en P assimilable est de 5,8 mg P kg⁻¹. C'est dire que la réponse du phosphore est très complexe, en fonction de la texture du sol, de sa teneur en sesquioxydes ou en calcium et des conditions d'humidité ayant prévalu au cours de la croissance.

Globalement, plus de 84% de l'engrais apporté n'a pas été utilisé par la culture, la première année de son application. Travaillant au laboratoire, sur 43 échantillons de sols divers, Vu *et al.* [19] montrent qu'au moment où le P non exporté par les cultures est adsorbé et/ou bloqué par les sesquioxydes dans les sols argileux tropicaux, il est resté labile et exposé à toute forme de pertes dans les sols sableux. Des analyses à long terme sur des grandes cultures [20, 21, 22, 23] ont souligné une tendance à l'accumulation du phosphore dans le sol, dès que les apports deviennent supérieurs aux expositions agricoles. C'est ainsi qu'une application prolongée de la méthode dite de fertilisation "équilibrée" (balance équilibrée entre les apports et les exportations), s'est traduite par une baisse du taux de phosphore dans le sol, sans réduction de la productivité agricole [24]. Mais il s'agissait de sols riches en sesquioxydes pouvant réduire les pertes par drainage en profondeur. De même, travaillant au laboratoire sur des sols agricoles, Dougherty *et al.* [25] montrent qu'un apport fractionné de 40 kg de P par ha réduit considérablement les risques de pertes que l'apport unique. Ils recommandent qu'une attention particulière soit accordée au timing d'épandage des engrais phosphatés sur des sols à faible pouvoir de fixation. En effet, travaillant en laboratoire, Svanbäck *et al.* [26] montrent que la perte de phosphore par lixiviation augmente brutalement dès que la dose d'apport dépasse le niveau des exportations par les cultures. Cette dose doit être déterminée pour chaque exploitation (climat, notamment la pluviométrie, le type de sol et les objectifs de rendement de l'exploitation), et doit servir de référence pour la fertilisation. Ainsi, dans le cas des sols sableux comme ceux du Niger, pour maximiser les rendements en minimisant les coûts des intrants et le mauvais impact sur l'environnement, l'équilibre apports-exportations doit être maîtrisé pour le phosphore.

Malgré leur extrême pauvreté en phosphore, avec 80% de phosphore de la plante provenant du sol (Pdfs), les sols sableux nigériens sont toujours la principale source de P pour la plante. Ceci témoigne que la connaissance du cycle biologique du phosphore dans un contexte donné est nécessaire pour définir une stratégie efficace de gestion de la fertilisation phosphatée. L'objectif est de maintenir une biodisponibilité suffisante pour des rendements optimum sans risque d'impact environnemental négatif, en tenant compte des paramètres pédoclimatiques.

Les phosphates naturels offrent une alternative pour la gestion de la fertilisation phosphatée des sols, surtout les sols acides, en particulier pour les légumineuses comme le niébé. Les résultats obtenus avec la dose de 35,5 kg P par ha avec le phosphate naturel de Tahoua appuient cette hypothèse. En outre, d'autres travaux [27], sur un sol argileux extrêmement pauvre en phosphore, rapportent plus de 50% du phosphore de la plante provenant du Phosphate naturel (de Gafsa) et seulement moins de 10% en provenance du sol. La question de la valorisation des phosphates naturels en utilisation directe ou légèrement acidulés a fait l'objet de plusieurs travaux antérieurs [5, 28, 29, 30]. Ces travaux mettent surtout l'accent sur l'importance des bactéries solubilisantes des Phosphates.

Malgré leur faible réactivité, les phosphates naturels sont préconisés comme stratégie de fertilisation pour les cultures faiblement exigeantes en phosphore. Nos résultats montrent que le niébé semble mieux valoriser le phosphate naturel de Tahoua que le mil, avec 20% de phosphate de la plante provenant du phosphate naturel (PdR) contre 10%. L'utilisation directe des phosphates naturels de Tahoua semble envisageable avec succès sur le Niébé.

5. Conclusion

Ce travail a permis de tirer un certain nombre de conclusions importantes pour une meilleure gestion de la fertilisation phosphatée dans les systèmes de culture mil-niébé des sols sableux nigériens. L'engrais soluble SSP, à la doses de 8,8 kg P ha⁻¹, a eu un effet significatif sur les rendements de mil, mais très faiblement sur le niébé. En revanche, il faut des doses relativement élevées de Phosphate naturel de Tahoua (<35,2 kg P ha⁻¹) pour obtenir un effet significatif positif. Le mixage d'un engrais soluble eau (SSP) avec le phosphate naturel de Tahoua à faible dose, a permis de mettre en évidence la participation du phosphate naturel à la nutrition phosphatée de la culture, à hauteur de 10% pour le mil et de 20% pour le niébé. Ceci fait dire que l'utilisation directe du phosphate naturel de Tahoua comme fertilisation phosphatée est envisageable, surtout pour la culture des légumineuses comme le niébé, sur les sols sableux dunaires du Niger.

Les coefficients réels d'utilisation de l'engrais soluble SSP sont de 15,29% et 8,6% , seul ou mixé avec le phosphate naturel de Tahoua. Soit plus de 84% de l'engrais ainsi apporté reste non utilisé par la plante la première année de l'application. Il est donc légitime de s'interroger sur le devenir immédiat de ce phosphore, notamment dans le cas de pluies abondantes pouvant entraîner des flux de drainages considérables en profondeur.

Dans la plante, la majeure partie du phosphore provient du sol (80%). Malgré leur extrême pauvreté en phosphore, les sols sableux dunaires restent la principale source de phosphore pour la plante. Cependant, ces résultats ne doivent pas être généralisés. Ils doivent être répétés

sur toutes les zones agroécologiques du Niger de sorte à pouvoir ressortir les situations pour lesquelles le phosphate naturel de Tahoua peut être réellement préconisé en utilisation directe, seul ou associé à des degrés divers à d'autres formes de phosphates solubles.

Références bibliographiques

1. C. **PIERI**; Food crop fertilization and soil fertility: the IRAT experience. In : Appropriate technologies for farmers in semi-arid West Africa. Ohm H.W. and NAGY J.G. Eds. Purdue University, Wets Lafayette, IN; 1985
2. C. **PIÉRI** ; fertilité des terres de savanes. Bilan de trente années de recherches et de développement agricole au sud du Sahara. Montpellier, Ministère de la coopération et CIRAD-IRAT, 1989.
3. J. **NABOS**, J. **CHOROY**, J. **PICHOT**; Fertilisation phosphatée des sols du Niger. Utilisation des phosphates naturels de Tahoua ». *Agronomie tropicale* (1974) vol. 29, n°11. pp. 1140-50.
4. A. **BATIONO**, A. **MANU**, U.A. **MOKWUNYE** and C.B. **CHRISTIANSON**; Soil fertility status and menagment for the millet-producing soils of West Africa. Annual Repport 1989.
5. A. **BATIONO**, S.H. **CHIEN**, J. **HENAO**, C.B. **CHRISTIANSON** AND A.U. **MOKWUNYE**; Agronomic evaluation of two unacidulated and partially acidulated rockphosphates indigenous to Niger. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 54 (1990), 1772-1777.
6. A. **BATIONO**, C.B. **CHRIANSON**, W.E **BAETHGEN** and A.U. **MKWUNYE** ; A farmal-level evaluation of nitrogen and phosphorus fertilizer use and planting density for pearl millet production in Niger. *Fertilizer research*, 31 (1992), pp 175-184
7. S. **DAOUDA OUSMANE** ; Comportement hydrique de cultivars de mil (*Pennisetum typhoides*) en conditions pédoclimatiques contraignantes : réactions de la plante entière à un stress hydrique post-floral. Thèse de Doctorat, 13 septembre 1996, Ecole Nationale Supérieure Agronomique de Rennes, 229p.
8. S. **DAOUDA OUSMANE**, M. **SICOT** et P. **MARINI**; Caractérisation de la diversité hydrodynamique d'un sol ferrugineux tropical, différencié sur sable dunaire en milieu soudano-sahélien. In : *Soil water balance in the sudano-sahelian zone*. Lancaster : AISH, 1991, (199), p. 209-216. (Publication - AISH; 199). Soil Water Balance in the Sudano-Sahelian Zone : International Workshop, Niamey (NER), 1991/02/18-23.
9. **INRAN**; Catalogue des variétés recommandées de mil, sorgho, niébé et autres cultures au Niger. Institut National de Recherche Agronomique du Niger (1987) pp 5-26.
10. M. **FRIED**; Quantitative evaluation of processed and naturel phosphates, *Agric Food Chem* 2 (5) 1954 : pp 241-244.
11. M. **FRIED**; Direct quantitative assessment in the field of fertlizer management practices. *XIè International Congress of Soil Science*, Alberta, Canada 1978, pp 103-129.
12. F. **ZAPATA**; Isotope techniques in soil fertility and plant nutrtn studies. in : Hardarson G (ed) Use of nuclear Techniques in Studies of Soil-Plant Relationships, pp 109-127. IAEA training course Series No 2 (1990), Vienna, Austria.
13. C.B. **CHRIASTIANSON**, A. **BATIONO**, J. **HENAO** and P.L.G. **VLEK** : Fate and

- Efficiency of N Fertilizers Applied to pearl millet in Niger. *Plant an Soil* 125, 221-231 (1990)
14. **MINISTÈRE DE L'AGRICULTURE, Direction des Statistiques.** Evaluation de la campagne agricole 2012 et Résultat définitif 2012-2013, *Rapport National de Synthèse*, Février 2013. 39 p
 15. **B. MUCHLIG-VERSEN, A. BUERKART, A. BATIONO and H. MARSHNER** ; Crop residue and phosphorus management in pearl millet based cropping system, on sandy soils of the Sahel. *Soil Fertility management in West African Land Use Systems*. G. Renard, A. Neef, K. Becker and M. Von Oppen (Editors); Niamey, Niger, 4-8 March 1997.
 16. **S. SINAJ, A. BUERKERT, G. EL-HAJJ, A. BATIONO, H. TRAORÉ and E. FROSSARD** ; Effects of fertility management strategies on phosphorus bioavailability in four West African soils. *Plant and Soil* 233: 71–83, 2001
 17. **H-Q HU, X-Y. LI, J-F. LIU, F-L. XU, J. LIU and F. LIU**; The effect of direct application of phosphate rock in increasing crop yield and improving properties of red soil. *Nutrient Cycling in Agroecosystems* 46: 235-239 (1997).
 18. **H. AMELIA, N. F. CHAVES, P.J.A. KLEINMAN and J.P. LYNCH (2010)** : Will nutrient-efficient genotypes mine the soil ? Effects of genetic differences in root architecture in common bean (*Phaseolus vulgaris* L.) on soil phosphorus depletion in a low-input agroecosystem in Central America; *Field Crops Research* 115 (2010) 67–78.
 19. **D. T. VU, R. D. ARMSTRONG, P. J. NEWTON and C. TANG** ; Long-term changes in phosphorus fractions in growers' paddocks in the northern Victorian grain belt. *Nutr Cycl Agroecosyst* (2011) 89:351–362.
 20. **C. MOREL, C. CACHOT, J. MARTINEZ, P. PEU, F. ELSASS, M. ROBERT ET J-CL. FARDEAU** ; Evolution sur 12 ans de la solubilité, mobilité et lixiviation du phosphate dans un sol ayant massivement reçu du lisier. *Étude et Gestion des Sols*, Volume 11, 4, 2004, pp 403-418.
 21. **H. PATHAK, S. MOHANTY, N. JAIN AND A. BHATIA** ; Nitrogen, phosphorus, and potassium budgets in Indian agriculture. *Nutr. Cycl. Agroecosyst.* (2010) 86:287–299
 22. **S. MISHIMA, A. ENDO and K. KOHYAMA (2010)** : Nitrogen and phosphate balance on crop production in Japan on national and prefectural scales. *Nutr. Cycl. Agroecosyst.* (2010) 87:159–173
 23. **D.P. VAN-VUUREN, A.F. BOUWMAN AND A.H.W. BEUSEN** ; Phosphorus demand for the 1970–2100 period: A scenario analysis of resource depletion. *Global Environmental Change* 20 (2010) 428–439
 24. **J. VERLOOP , J. OENEMA, S. L. G. BURGERS, H. F. M. AARTS AND H. VAN KEULEN** ; P-equilibrium fertilization in an intensive dairy farming system: effects on soil-P status, crop yield and P leaching; *Nutr Cycl Agroecosyst* (2010) 87:369–382
 25. **W. J. DOUGHERTY, L. L. BURKITT, R. CORKREY AND D. M. HARVEY** ; The effect of soil P sorption properties and phosphorus fertilizer application strategy on 'incidental' phosphorus fertilizer characteristics: a laboratory study, *Nutr Cycl Agroecosyst* (2011) 89:189–197

26. A. SVANBÄCK, B. ULÉN, A. ETANA, L. BERGSTRÖM, P. J. A. KLEINMAN AND L. MATTSSON ; Influence of soil phosphorus and manure on phosphorus leaching in Swedish topsoils; *Nutr Cycl Agroecosyst*, [Published online 24 August 2013](#).
27. A.B. ANKOMAH, F. ZAPATA, S.K.A. DANSO AND H. AXMANN ; Cowpea varietal differences in uptake of phosphorus from Gafsa phosphate rock in a low-P Ultisol. *Fertilizer research* 41 (1995) : 219-225
28. E. COMPAORÉ, J-Y. GRIMAL, J-L. MOREL, J-CL. FARDEAU ; Efficacité du phosphate naturel de Kodjari (Burkina Faso). *Cahiers Agricultures, Volume 6, Numéro 4, pages 251 à 255, Juillet-Août 1997*
29. A. H. BABANA & H. ANTOUN ; Effect of Tilemsi phosphate rock-solubilizing microorganisms on phosphorus uptake and yield of field-grown wheat (*Triticum aestivum* L.) in Mali. *Plant and Soil* (2006) 287:51–58
30. Q. A. PANHWAR, O. RADZIAH, U.A. NAHER, A-R. ZAHARAH, M. I. RAZI AND J. SHAMSHUDDINI ; Effect of phosphate-solubilizing bacteria and oxalic acid on phosphate uptake from different P fractions and growth improvement of aerobic rice using ³²P technique, *Australian Journal of Crop Science* 7(8):1131-1140 (2013)

2.6. Devenir de l'azote dans le système de culture mil-niébé sur sol sableux au Niger

Le mil est cultivé pour ces graines mais aussi, de plus en plus, pour la paille. Il est l'une des rares cultures qui donnent une relative satisfaction dans les conditions sèches et de sols très peu fertiles du Sahel. Au Niger, il représente la principale base alimentaire de plus de 8 millions d'habitants. A part le problème de manque d'eau, le déficit en phosphore et en azote représente la principale contrainte pour l'agriculture sahélienne. Beaucoup de recommandations insistent sur l'importance de l'application des engrais minéraux pour accroître la productivité agricole et atteindre les besoins alimentaires d'une population africaine en forte croissance. Le recours à des doses d'engrais (et de pesticides) de plus en plus élevées constitue une énorme préoccupation pour la prévention des risques environnementaux, notamment la pollution du réseau hydrographique. Plusieurs travaux antérieurs ont caractérisé et mesuré les déterminants de cette pollution, mais la plupart de ces travaux se sont surtout focalisé sur l'utilisation des doses massives sur des sols de textures le plus souvent fines, ou sur les usages agricoles intensifs. Très peu de travaux ont porté sur les sols sableux de faibles capacités de rétention en eau et en éléments minéraux, dans les conditions arides du Sahel. Dans les sols sableux perméables et profonds, les risques de pertes par lessivage de l'azote de l'engrais sont élevés. Arauzo et Walladolid (2013), montrent que de tous les facteurs déterminant la lixiviation, les caractéristiques du sol dont la texture est de loin la plus importante. Au Niger la grande perméabilité des sols, leur faible capacité de stockage des minéraux et de l'eau autorisent à s'interroger sur le devenir de l'azote apporté par les engrais. Même si de récents travaux (Hayashi *et al.* (2012), ont montré que, le modèle d'exploitation extensive nigériens se traduit par un bilan azoté au champ de -8 kg N ha^{-1} par an. Une meilleure compréhension du devenir de l'azote dans les systèmes de cultures mil-niébé au Niger s'avère nécessaire, à cause des changements importants en cours dans les pratiques agricoles des petits exploitants agricoles et des récents changements climatiques. Ce travail a pour objet principal d'évaluer la dose recommandée de 46 U d'azote en faisant le bilan de l'azote apporté par l'engrais afin de déterminer sa répartition dans le système de culture mil-niébé sur sol sableux sahélien.

Les coefficients réels d'utilisation des engrais azotés varient entre 20 et 30% dans les conditions des sols sableux et arides du Niger. Malgré la faible teneur en matière organique des sols sableux du Niger, ils restent la principale source d'azote pour la culture du mil. Les résultats montrent qu'on retrouve la presque totalité de cet azote dans le sol entre 0 et 40 cm

de profondeur. Il n'a pas été entraîné au-delà de la zone racinaire par l'eau, malgré les pluies abondantes du mois de septembre ayant amené le front d'humectation au-delà de 220 cm.

Ce travail a été publié dans les Annales de l'Université Abdou Moumouni, Tome XVII-A, pp. 6-17, 2^e semestre 2014; pp 6-17 ; **Daouda Ousmane S. (2014). Devenir de l'azote de l'engrais dans le système de culture mil-niébé sur un sol sableux au Niger: utilisation du traceur ¹⁵N.**

Devenir de l'azote de l'engrais dans le système de culture mil-niébé sur un sol sableux au Niger: utilisation du traceur ¹⁵N.

Daouda Ousmane S*.

Institut des Radio-Isotopes, Université Abdou Moumouni, BP 10 727 Niamey Niger.

*Auteur correspondant : dsaniri@yahoo.fr

Résumé : Le recours à des doses de plus en plus élevées d'engrais chimiques pour garantir une meilleure productivité agricole accroît le risque de lixiviation des minéraux et la pollution des réseaux hydrographiques au Niger. Le système extensif de culture mil-niébé au Niger se caractérise par des sols sableux dunaires de faibles capacités de rétention en eau et en éléments nutritifs, offrant des conditions favorables au drainage et à la lixiviation avec les abondantes pluies des mois de Juillet à Septembre. Cette expérimentation a été entreprise sur un sol ferrugineux tropical à texture sableuse pour préciser le devenir de l'azote d'un engrais azoté comportant de l'ammonium et du nitrate à la dose recommandée de 46 kg N ha⁻¹, en faisant appel au ¹⁵N. Les coefficients réels d'utilisation de l'engrais ont été de 28,8% et 19,9% pour le mil en culture pure et en culture associée respectivement. L'introduction des rangs de niébé entre les rangs de mil a entraîné une baisse significative du taux d'utilisation de l'engrais par le mil. Malgré la pauvreté en matière organique et en azote des sols sableux nigériens, ils assurent à moitié la nutrition de la plante en azote et restent la principale source d'azote pour la culture du mil. L'azote résiduel de l'engrais a été retrouvé presque intégralement dans le sol entre 0 et 40 cm de profondeur. Il n'a pas été entraîné au delà de la zone racinaire par l'eau, malgré les pluies abondantes du mois de Septembre ayant amené le front d'humectation au delà de 220 cm.

Mots clés : Fertilisation, azote 15, mil, niébé, IRI, Niger

Fate of nitrogen fertilizer in the millet-cowpea cultivation system on sandy soil in Niger, using ¹⁵N tracer.

Abstract : The gradual use of high doses of chemical fertilizers to ensure higher agricultural productivity increases the risk of leaching of minerals and pollution of river systems in Niger. The millet and cowpea crops system in Niger are characterized by soils with low holding capacity of water and nutrients offering favorable conditions for drainage and lixiviation with abundant rains in July-September. This experiment was undertaken on a tropical ferruginous sandy soil to clarify the fate of nitrogen fertilizer containing ammonium and nitrate at the recommended rate of 46 kg N ha⁻¹, using ¹⁵N. The real coefficients of fertilizer use were found to be 28.8 % and 19.9 % for millet and for millet associated with cowpea, respectively. The introduction of cowpea rows between rows of millet resulted in a significant decrease in the use of fertilizer by millet crop. Despite their poverty of organic matter, Niger sandy soils provided half the plant nitrogen nutrition and were the main source of nitrogen for growing millet. The residual nitrogen from the fertilizer was almost entirely found in the soil between 0 and 40 cm deep. It has not been driven beyond the root zone by water, despite heavy rains in September which led the wetting front beyond 220 cm.

Key words : Fertilization, nitrogen 15, millet, cowpeas, IRI, Niger

1. Introduction

Le mil est cultivé pour ses graines mais aussi, de plus en plus, pour la paille. Il est l'une des rares cultures qui donnent une relative satisfaction dans les conditions sèches et de sols très peu fertiles du Sahel. Au Niger, il représente la principale base alimentaire de plus de 8 millions d'habitants. A part le problème de manque d'eau, le déficit en phosphore et en azote représentent la principale contrainte pour l'agriculture sahélienne [1]. Beaucoup de recommandations insistent sur l'importance de l'application des engrais minéraux pour accroître la productivité agricole et atteindre les besoins alimentaires d'une population africaine en forte croissance [2; 3]. Le recours à des doses d'engrais (et de pesticides) de plus en plus élevées constitue une énorme préoccupation pour la prévention des risques environnementaux, notamment la pollution du réseau hydrographique [4]. Plusieurs travaux antérieurs ont caractérisé et mesuré les déterminants de cette pollution, mais la plupart d'entre eux se sont surtout focalisé sur l'utilisation des doses massives sur des sols de textures le plus souvent fines [5; 6; 7; 8], ou sur les usages agricoles intensifs [9; 10; 11]. Très peu de travaux ont porté sur les sols sableux de faibles capacités de rétention en eau et en éléments minéraux, dans les conditions arides du Sahel. Dans les sols sableux perméables et profonds, les risques de pertes par lessivage de l'azote de l'engrais sont élevés [12; 13]. Azumo *et al.* [14] montrent que de tous les facteurs déterminant la lixiviation, la texture du sol est de loin le facteur le plus important. Au Niger, la grande perméabilité des sols et leur faible capacité de stockage des minéraux et de l'eau autorisent à s'interroger sur le devenir de l'azote apporté par les engrais. Même si de récents travaux [15] ont montré que le modèle d'exploitation extensive nigérien se traduit par un bilan azoté au champ de -8 kgN ha^{-1} par an, une meilleure compréhension du devenir de l'azote dans les systèmes de cultures mil-niébé au Niger s'avère nécessaire, à cause des changements importants en cours dans les pratiques agricoles des petits exploitants agricoles et des récents changements climatiques. Ce travail a pour objet principal d'évaluer la dose recommandée de 46 unités d'azote en faisant le bilan de l'azote apporté par l'engrais afin de déterminer sa répartition dans le système de culture mil-niébé sur sol sableux sahélien.

2. Matériel et méthodes

2.1. Description du site expérimental

Le terrain de l'essai est une parcelle expérimentale de l'Institut des Radio-Isotopes (IRI) à l'Université Abdou Moumouni de Niamey au Niger. Il s'agit d'une terre cultivée en mil, souvent associé au niébé, en condition d'apport minéral très modéré. Le terrain est un sol ferrugineux tropical sur sable dunaire, peu évolué, peu lessivé et désaturé, pauvre en éléments fins et en matière organique [16, 17]. Les analyses pédologiques réalisées au Laboratoire de fertilité des sols de l'IRI ont révélé, sur les 50 premiers cm du sol (Tableau I), une dominance de sable (96,3%), très peu de matière organique (1,4 %) et une très faible capacité d'échange cationique (1,3 méq/100g de sol), une faible teneur en phosphore assimilable (P_2O_5 Olsen : $0,88 \text{ mg kg}^{-1}$) et un pH légèrement acide. Le sol est profond, mais de faible capacité de

rétenion en eau ($0,08$ à $1,12 \text{ cm}^3/\text{cm}^3$) entre 0 et 1 mètre de profondeur [17].

Tableau I: Caractéristiques physico-chimiques du sol.

Caractéristiques du sol (0-50 cm)	
Sables Grossiers (g kg^{-1})	733
Sables fins (g kg^{-1})	230
Limons (g kg^{-1})	20
Argiles (g kg^{-1})	17
Humidité équivalente ($\text{m}^3 \text{ m}^{-3}$)	0,019
Densité apparente (kg m^{-3})	1750
pH (H ₂ O)	6
Matière organique (g kg^{-1})	1,4
Teneur en Azote Kjeldahl (g kg^{-1})	0,09

La pluviométrie a été mesurée à l'aide d'un pluviomètre à lecture directe installé à proximité de la parcelle expérimentale, à $1,5$ mètre du sol. Le cumul pluviométrique de l'année 2009 est de 491 mm, reparti en 36 jours de pluie et avec plus de 300 mm pour les seuls mois de Juillet et Août (Tableau II). Ceci est souvent à l'origine d'abondants drainages en profondeur qui peuvent rendre considérables les pertes d'éléments nutritifs, en particuliers sur les sols sableux. La moyenne pluviométrique à long terme est de 560 mm à la hauteur de Niamey [18]

Tableau II : hauteurs pluviométriques (mm) de l'année 2009 enregistrées sur le site de Niamey

Décades	Avril	Mai	Juin	Juillet	Août	Septembre	Octobre	Total année
1	0	0	20,5	15,0	45,0	45,0	0,0	
2	0	0	37,5	26,5	130,0	23,0	23,0	
3	2,5	13,0	2,5	87,0	25,0	2,0	2,0	
Total Mois	2,5	15,5	60,5	129,	185,0	70,0	31,0	491,0
jours de pluie	1	2	5	10	9	7	2	36

2.2. Dispositif expérimental et traitements

L'expérimentation a été menée sur une parcelle délimitée au grillage non loin du laboratoire d'analyse des sols et végétaux de l'Institut des Radio-Isotopes. Les conditions expérimentales ont été choisies de façon à être les plus proches possibles des conditions de culture extensive de l'agriculteur nigérien : faible utilisation des intrants (semences sélectionnées, engrais, pesticides), labour léger, exportation totale de la matière sèche aérienne à la récolte. La parcelle expérimentale se situe au sein de l'Université Abdou Moumouni de Niamey, au Niger (latitude $13^{\circ}29' \text{ N}$, longitude $2^{\circ}10' \text{ E}$). Deux méthodes de culture sont comparées : le mil pur (M), et le mil-niébé en association (MN), avec quatre répétitions, soit 8 parcelles élémentaires de $18 \times 9 \text{ m}^2$. Les micro-parcelles recevant l'engrais marqué sont installées sur les poquets centraux de chaque parcelle élémentaire. Leur surface varie en fonction de la culture. Soit : $1,50 \text{ m}^2$ pour mil pur, et $2,25 \text{ m}^2$ pour mil-niébé. Elles sont délimitées par une tôle haute de 20 cm et enfoncée de 15 cm dans le sol. L'expérimentation est conduite en plein champ, en culture pluviale stricte, sans aucun apport d'eau d'irrigation complémentaire. Le mil est semé

avec un écartement de 1,5 m x 0,75 m soit une densité de 8 889 poquets ha⁻¹. Le semis est manuel. Les graines (10 à 20 par poquet) sont enterrées entre 3 et 10 cm de profondeur, après la première pluie efficace. Le phosphore a été apporté avant le semis, à la dose de 8,8 kg P ha⁻¹ sous forme de Super Phosphate Simple (SSP). L'azote a été apporté plus tard au tallage et à la montaison à la dose totale de 46 kg N ha⁻¹ à proximité des pieds de mil et immédiatement incorporé par un léger scarifiage. Il n'y a pas eu d'apport de potassium. L'engrais azoté marqué a été apporté à la même dose et de la même manière sur les micro parcelles. Le niébé a été semé à la densité de 17 778 poquets ha⁻¹ à raison de 3 graines par poquet, 19 jours après celui du mil. Le niébé a reçu le même apport phosphaté que le mil mais n'a reçu ni d'azote ni potassium. Le niébé est semé, en quinconce entre les rangs de mil.

Le rendement est estimé à partir de 10 poquets choisis au hasard avant le semis sur les rangs de mil du milieu. La récolte est répartie entre tiges, feuilles et épis. Pour le niébé elle est répartie entre fanes et gousses. La matière sèche est pesée après passage à l'étuve à 80°C pendant 48 heures. Les poquets des micro-parcelles marquées sont utilisés pour la mesure de l'excès isotopique et le calcul des coefficients d'utilisation de l'engrais dont seules les parties aériennes sont prises en considération.

La détermination de l'azote résiduel dans le sol a été faite sur les microparcelles marquées, en mai 2010 après la première pluie. Deux échantillons de sol (0-20 et 20-40) ont été prélevés sur deux sites de chaque traitement. Pour 0-20, l'intégralité de la couche de terre est récoltée, de laquelle est extraite après homogénéisation un sous échantillon de 50 g. Pour 20-40 cm, les échantillons ont été prélevés grâce à un carottier suivant 7 trous bien repartis sur la micro-parcelle. Sur l'ensemble des résultats, les comparaisons des moyennes ont été faites deux à deux selon la méthode du "t" de Student, au seuil de risque statistique de 5%.

2.3. Matériel végétal

La variété de mil choisie est le *Haïni Kiré Précoce (HKP)*, à cycle moyen de 85-90 jours et qui s'adapte aux pluviométries moyennes de 300 à 450 mm [4]. Le niébé est la *TN 578*, une variété locale à port rampant. Elle est tolérante à la sécheresse et montre un rendement stable et régulier, caractéristiques qui lui valent sa vulgarisation au Niger.

2.4. Déroulement de la culture

Le semis du mil a eu lieu le 06 Juin 2009 après une pluie de 20 mm. Le phosphore a été apporté avant le semis. Les microparcelles ont reçu l'engrais marqué aux mêmes doses que la surface non marquée. L'azote a été apporté plus tard, moitié au tallage et moitié à la montaison, à la dose totale de 46 kg N ha⁻¹ en forme de cercle autour des pieds de mil et immédiatement incorporé par un léger scarifiage. Il n'y a pas eu d'apport de potassium. Le niébé a été semé, entre les rangs de mil, à la densité de 17 778 poquets ha⁻¹ à raison de 3 graines par poquet, 14 jours après le semis du mil. Le niébé a reçu le même apport phosphaté que le mil mais n'a reçu ni d'azote ni potassium.

2.5. Déterminations analytiques

Matière sèche aérienne

La matière sèche est estimée à la récolte sur les placettes rendement. Ces placettes sont constituées de 10 poquets choisis au hasard avant le semis sur les rangs du milieu. Chaque parcelle élémentaire (répétition) comporte une "placette rendement". La matière sèche est estimée de la même manière sur le mil et sur le niébé. Le poquet est intégralement récolté et la biomasse répartie entre tiges et feuilles d'une part et épis d'autre part. Pour le niébé elle est répartie entre fanes et gousses. La matière sèche est pesée après séchage à l'étuve à 80°C pendant 48 heures. Les poquets des micro-parcelles marquées sont destinés à la détermination de la radioactivité dans les parties aériennes.

Traitement des données et expression des résultats

L'azote total est déterminé selon la méthode Kjeldahl-Olsen, modifiée par Guiraud et Fardeau [19]. L'azote 15 est déterminé par spectrométrie optique (SOPRA GS1).

L'azote de la plante (N_{df}) et le coefficient réel d'utilisation de l'engrais (CRU) sont calculés selon les formules :

$$N_{df}\% = \frac{X}{Q_N} 100 = \frac{E_{pl}}{E} 100$$

$$CRU\% = \frac{Q_N E_{pl}}{FE} 100 = \frac{Q_N}{F} N_{df}\%$$

Avec :

Q_a : la quantité d'azote de la plante dont une quantité X qui provient de l'engrais

E_{pl} : l'excès isotopique de la plante

F : la quantité d'azote de l'engrais

E : l'excès isotopique de l'engrais

3. Résultats

3.1. Matière sèche aérienne et rendement

Les rendements en grains obtenus sont de 1,36 et 1,04 tha⁻¹ pour les deux cultures de mil en culture pure et de mil associé au niébé respectivement. Les analyses statistiques montrent une différence significative en faveur de la culture pure. Les rangs de niébé insérés entre les rangs de mil ont entraîné une baisse de la productivité du mil. La production de matière sèche totale (MST) varie de 3,81 à 4,15 tha⁻¹ sans différence significative entre les deux cultures. L'effet de l'association se traduit par une baisse de rendement en grains.

Tableau I : Production de grain de mil et de matière sèche aérienne (MST) (en t ha⁻¹) du mil pur comparée à celle du mil associé au niébé.

	Rendement Grains (t ha-1)		MST (t ha-1)	
	Moyenne	cv	Moyenne	cv
Mil pur	1.36	34%	4.15	15%
Mil-Niébé	1.04	33%	3.81	15%
Signification	S		NS	

3.2. Quantité d'azote prélevée par la plante

Les teneurs en azote varient entre 3,4 ‰ à 18,9 ‰ légèrement plus élevée sur la culture pure de mil que sur le mil associé au niébé (Tableau II). Comme précédemment montré par Batiano *et al.* [20] la concentration en N est 4 à 5 fois plus forte dans les épis que dans les tiges. L'exportation totale en azote varie de 32 kg ha⁻¹ pour le mil en association à 40 kg ha⁻¹ pour le mil en culture pure. En considérant l'azote des racines, on peut penser qu'il y a équilibre entre l'apport des engrais et l'azote exporté par la plante. En effet les masses des matières sèches des racines du mil sont évaluées à environ 20% des matières sèches totales dans ces sols sableux sahéliens, mais peuvent atteindre 40% en cas de stress hydrique poussé [16]. L'azote des racines reste au sol et peut être remobilisé pour les cultures antérieures.

3.3 Coefficient réel d'utilisation de l'engrais azoté

Les valeurs moyennes des coefficients réels d'utilisation du CAN sont rapportées au tableau III. Elles sont de 28,8% et 19,9% pour le mil en culture pure et en culture associée respectivement. L'introduction des rangs de niébé entre les rangs de mil a entraîné une baisse significative du taux d'utilisation de l'engrais par le mil. Ces résultats se rapprochent de ceux déjà rapportés antérieurement dans des conditions comparables [5]. En revanche ils sont plus faibles que ceux obtenus sur des cultures de maïs et de blé en conditions de culture intensives [21; 22].

Tableau II : Teneur et Exportation totale en N du mil en culture pure et en association avec le niébé.

		N ^{0/00}	MS(kg/ha)	N total (kg/ha)
Mil Pur	Epi	18,9	1526	28,8
	Tige	4,35	2623	11,4
	Total			40,3
Mil/Niébé	Epi	17,18	1386	23,8
	Tige	3,38	2422	8,2
	Total			32,0

Tableau III : Coefficients réels d'utilisation de N par le mil en culture pure et en association avec le niébé

Parcelle	CRU%	Ndff%
Mil pur	28,9 ± 6,2	54,1 ± 12,2
Mil-niébé (Sur mil seulement)	19,9 ± 2,9	49,0 ± 5,2
Signification :	S (0,037)	NS (0,470)

3.4. Azote dans la plante originaire de l'engrais Ndff

Les valeurs de l'azote de la plante originaire de l'engrais sont présentées au tableau III. Elles sont de 54,1% pour la culture pure et de 49% pour la culture associée. Ce résultat montre que la plante de mil s'alimente à part égale entre le sol et l'engrais apporté. Malgré la pauvreté en matière organique et en azote de ces sols, ils assurent à moitié la nutrition de la plante en azote. Dans des conditions comparables, Sarr et al. [23] ont rapporté des valeurs nettement inférieures (15,3%). Des valeurs de 10-16% ont également été obtenues sur du blé en milieu tempéré [24] et 29% sur la pomme de terre [25].

3.5. L'azote de l'engrais restant dans le sol

L'azote de l'engrais resté au sol est donné au tableau IV. Il varie de 70,3% pour la culture pure à 50,3% pour la culture associée. Il est presque intégralement retrouvé au sol entre 0 et 40 cm. En tenant compte des CRU obtenus on en déduit qu'il y a perte d'azote de l'engrais uniquement dans le cas de la culture associée qui s'élève à 29,8%. Il faudra cependant signaler que cet azote non comptabilisé peut avoir été utilisé par la culture intercalaire de niébé et qu'il serait plus juste de parler de perte que pour la culture du mil.

Tableau IV : Azote résiduel après la première année de culture et répartition entre 0 et 40 cm de profondeur.

		N %	Excès %	N total (kg)	15N résiduel (kg)	% 15N apporté
Mil pur	0-20	0,014	0,519	462,0	2,40	52,1
	20-40	0,011	0,231	363,0	0,84	18,2
	Total			825,0	3,24	70,3
Mil-Niébé	0-20	0,15	0,376	508,2	1,91	41,5
	20-40	0,11	0,110	369,6	0,41	8,8
	Total			877,8	2,32	50,3

4. Discussion

La production de grain de la culture pure de mil dépasse significativement celle de la culture associée, les productions en matières sèches totales restant comparables. L'introduction de rangs de niébé entre les rangs de mil a entraîné une réduction du transfert des assimilats des tiges vers les épis. Des résultats antérieurs [26; 27] ont montré qu'en l'absence de facteurs limitants, la densité du niébé n'affecte pas le rendement du mil. Dans cette hypothèse, on peut croire qu'au moins un des facteurs de production a été limitant dans l'association mil-niébé. Si l'on suppose que le niébé peut ne pas faire de compétition pour l'azote, ceci reste possible pour d'autres éléments nutritifs comme le phosphore, le potassium, le soufre ou l'eau. En outre, la compétition pour l'eau peut être cruciale par la réduction des flux de transpiration et de transfert d'assimilat pour la formation des graines [16].

Les coefficients réels d'utilisation des engrais azotés varient entre 20 et 30% dans les conditions des sols sableux en climat semi-aride du Niger. Nos résultats confirment ceux déjà obtenus au Sénégal [28; 29; 23]. Des valeurs supérieures à 30% ont été obtenues avec des cultures qui valorisent mieux l'azote que le mil : le maïs, le blé et la pomme de terre [21; 22; 25; 7], mais aussi dans des conditions hydriques plus favorables. Le sol est la principale source d'azote pour la plupart des cultures [30]. Entre 50 et 80% de l'azote de la plante

viennent du sol et quelques soit la dose d'engrais azoté appliquée. ce résultat correspond parfaitement aux résultats antérieurs, dans diverses situations [31; 23; 25; 7]. Ceci souligne l'importance de la matière organique du sol (y compris les résidus de culture) pour la fertilité des sols et la nutrition azoté des plantes. Malgré la faible teneur en matière organique des sols sableux du Niger, elle reste la principale source d'azote pour la culture du mil. Plus de 70% de l'azote de l'engrais n'a pas été exporté par les biomasses aériennes, après la première récolte. Il peut être resté au sol comme il peut être perdu par volatilisation ou par entraînement au delà de la zone racinaire. Les résultats du tableau IV nous montrent qu'on retrouve la presque totalité de cet azote dans le sol entre 0 et 40 cm de profondeur. Il n'a pas été entraîné au delà de la zone racinaire par l'eau, malgré les pluies abondantes du mois de septembre ayant amené le front d'humectation au delà de 220 cm (Figures 1 et 2). Et plus de 50% de l'azote apporté se trouve en surface entre 0 et 20 cm de profondeur. Travaillant sur les cultures céréalières dans les conditions tempérées, Valkama et al. [33] montrent que les pH acides favorisent l'accumulation de l'azote dans le profil et concluent que la dose écologiquement optimale n'est pas celle qui conduit aux rendements maximum. Les pertes par volatilisation sont négligeables. Cette voie de perte a été déjà réduite par l'incorporation de l'engrais après apport en cercle de 20 cm de rayon autour du poquet. Travaillant sur plusieurs systèmes de cultures, Ruidisch et al. [34] montrent que la perte par drainage est réduite de 59% suite à un fractionnement en 3 parts d'un apport total de 150 kg N ha⁻¹. Raun et Johnson [32] estiment à plus de 15,9 milliards de dollars US, le coût annuel des engrais non exportés par les cultures. D'un autre côté, les prix des engrais chimiques augmentent avec la hausse du coût de l'énergie pendant que les agriculteurs sont de plus en plus pauvres. Aussi la rationalisation de la gestion de la fertilisation chimique devient un double facteur pour l'augmentation des revenus des agriculteurs ruraux, par l'augmentation de la productivité des terres et par la réduction des dépenses en engrais chimiques en limitant les pertes.

5. Conclusion

Ce travail montre que les coefficients réels d'utilisation de l'ammonitrate de calcium à la dose recommandée de 46 kg N ha⁻¹ varient entre 28,8% et 19,9% pour le mil en culture pure et en culture associée respectivement. L'introduction des rangs de niébé entre les rangs de mil a entraîné une baisse significative du niveau d'utilisation de l'engrais par le mil. Malgré la pauvreté en matière organique et en azote de sols sableux arides du Niger, ils assurent à moitié la nutrition du mil en azote. Ceci souligne l'importance du niveau de matière organique pour le maintien de la fertilité dans ces systèmes de culture. L'azote résiduel, après la première culture, a été retrouvé presque en totalité dans le sol entre 0 et 40 cm de profondeur. Il n'a pas été entraîné au delà de la zone racinaire par l'eau, malgré les pluies abondantes du mois de septembre ayant amené le front d'humectation au delà de 220 cm.

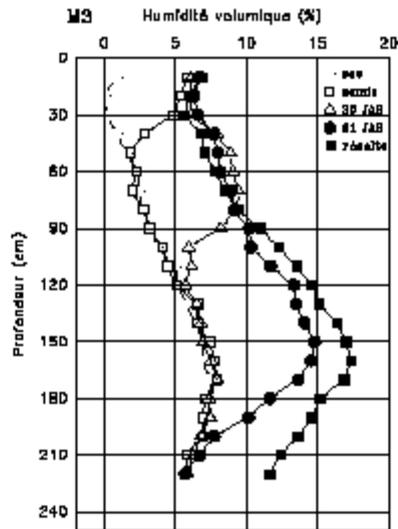


Figure 1 : Evolution des profils hydriques du sol sous la culture de mil pur en 2009

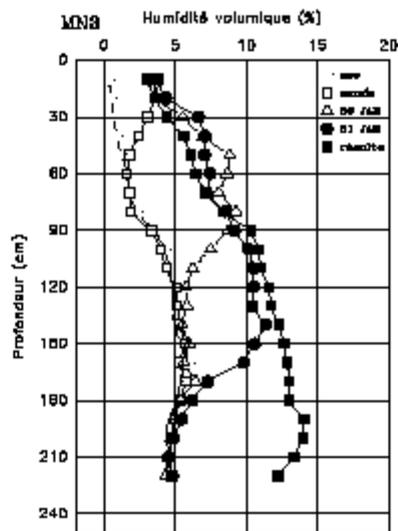


Figure 2 : Evolution des profils hydriques du sol sous la culture de mil associée au niébé en 2009

BIBLIOGRAPHIE

1. BREMAN H. and WIT C.T.: Rangeland productivity and exploitation in the Sahel. *Science* 221 (1983), 1341-1347.
2. SCHLECHT E., BUERKERT A., TIELKES E., BATIONO A. (2006): A critical analysis of challenges and opportunities for soil fertility restoration in Sudano-Sahelian West Africa. *Nutr Cycl Agroecosyst* 76:109–136.
3. FOFANA B., WOPEREIS M.C.S., BATIONO A., BREMAN H. AND MANDO A (2008): Millet nutrient use efficiency as affected by natural soil fertility, mineral fertilizer use and rainfall in the West African Sahel. *Nutr Cycl Agroecosyst* 81:25–36.
4. SPIERTZ J.H.J. 2010: Nitrogen, sustainable agriculture and food security. A review. *Agron. Sustain. Dev.* 30 (2010), 43–55.
5. CHRISTIANSON C.B., BATIONO A., HENAO J. and VLEK P.L.G.: Fate and Efficiency of N Fertilizers Applied to pearl millet in Niger. *Plant an Soil* 125, 221-231 (1990)
6. JIA S., WANG X., YANG Y., DAI K., MENG C., ZHAO Q., ZHANG X., ZHANG D., FENG Z., SUN Y., WU X., CAI D. AND GRANT C.: Fate of labeled urea-¹⁵N as basal and topdressing applications in an irrigated wheat–maize rotation system in North China Plain: I winter wheat. *Nutr. Cycl. Agroecosyst.* (2011) 90:331–346.
7. RIMSKI-KORSAKOV H., RUBIO G. AND LAVADO R. S.: Fate of the nitrogen from fertilizers in field-grown maize. *Nutr. Cycl. Agroecosyst.* (2012) 93:253–263
8. KETTERING J., RUIDISCH M., GAVIRIA C., SIK Y. AND KUZYAKOV Y.: Fate of fertilizer ¹⁵N in intensive ridge cultivation with plastic mulching under a monsoon climate. *Nutr. Cycl. Agroecosyst.* (2013) 95:57–72.)
9. ZHANG W.L., TIAN Z.X., ZHANG N. AND LI X.Q.: Nitrate pollution of groundwater in northern China. *Agric. Ecosyst. Environ.* 59 (1996), 223–231.
10. KIM B., PARK J.-H., HWANG G., JUN M.-S. AND CHOI K.: Eutrophication of reservoirs in South Korea. *Limnology* 2 (2001), 223–229.
11. PARK J.-H., DUAN L., KIM B., MITCHELL M.J. AND SHIBATA H.: Potential effects of climate change and variability on watershed biogeochemical processes and water quality in Northeast Asia. *Environ. Int.* 36 (2010), 212–225.
12. HUBBARD R.K. AND SHERIDAN J.M. (1994) : Retention of solutes by clayed coastal plain soils. *J. Soil Water Conserv.* 49: 90-96 (1994).
13. MENEZES R.S.C., GASCHO G.J., HANNA W.W., CABRERA M.L. AND HOOK (J. E. 1997) : Subsoil Nitrate Uptake by Grain Pearl Millet. In *Agron. J.* 89 (1997) :189-194
14. ARAUZO M. AND VALLADOLID M.: Drainage and N-leaching in alluvial soils under agricultural land uses: Implications for the implementation of the EU Nitrates Directive. *Agriculture, Ecosystems and Environment* 179 (2013) 94– 107.
15. HAYASHI K., MATSUMOTO N., HAYASHI E. T., ABDOULAYE T., SHINJO H., TABO R., MATSUNAGA R. AND TOBITA S.: Estimation of nitrogen flow within a village-farm model in Fakara region in Niger, Sahelian zone of West Africa; *Nutr. Cycl. Agroecosyst.* (2012) 92:289–304.

16. DAOUDA OUSMANE S.; Comportement hydrique de cultivars de mil (*Pennisetum typhoides*) en conditions pédoclimatiques contraignantes : réactions de la plante entière à un stress hydrique post-floral. Thèse de Doctorat, 13 septembre 1996, Ecole Nationale Supérieure Agronomique de Rennes, 229p.
17. DAOUDA OUSMANE S., SICOT M. et MARINI P.; Caractérisation de la diversité hydrodynamique d'un sol ferrugineux tropical, différencié sur sable dunaire en milieu soudano-sahélien. In: *Soil water balance in the sudano-sahelian zone*. Lancaster: AISH, 1991, (199), p. 209-216. (Publication - AISH; 199). Soil Water Balance in the Sudano-Sahelian Zone: International Workshop, Niamey (NER), 1991/02/18-23.
18. SIVAKUMAR M.V.K. (1986): Agroclimatology Progress report. 1. Climat of Niamey. ICRISAT, Niamey Niger. pp 36.
19. GUIRAUD G. et FARDEAU J.-C.: Détermination isotopique par spectrométrie optique de composés faiblement enrichis en azote 15. *Analisis* 8, n°4 (1980), 148-152.
20. BATIONO A., RISTIANSOON CB AND KLAIJ MC. (1993) : The effect of residue and fertilizer use on pearl millet yields in Niger. *Fertilizer Reseach* 34 (1993): 251-258,
21. STEVENS WB, HOEFT RG. AND MULVANEY RL (2005) : Fate of Nitrogen-15 in a long-term nitrogen rate study: II. Nitrogen uptake efficiency. *Agron. J.* 97:1046-1053.
22. TOLESSA D., DU PREEZ CC. AND CERONIO GM (2007): Fate of nitrogen applied to maize on conventional and minimum tilled Nitisols in Western Ethiopia. *S. Afr. J. Plant Soil* 24:77-83.
23. SARR P.S., KHOUMA M., SENE M., GUISSÉ A., BADIANE A. N. AND YAMAKAWA T.: Effect of pearl millet-cowpea cropping systems on nitrogen recovery, nitrogen use efficiency and biological fixation using the ¹⁵N tracer technique. *Soil Science and Plant Nutrition* (2008) 54, 142-147).
24. LAM S. K., CHEN D., NORTON R. AND ARMSTRONG R.: Nitrogen demand and the recovery of ¹⁵N-labelled fertilizer in wheat grown under elevated carbon dioxide in southern Australia. *Nutr. Cycl. Agroecosyst.* (2012) 92:133-144)
25. JIAO F., WU J., YU L. AND ZHAI R.: ¹⁵N tracer technique analysis of the absorption and utilisation of nitrogen fertiliser by potatoes. *Nutr. Cycl. Agroecosyst.* (2013) 95:345-351.
26. RENARD R C.; NTARE B.R. ET. FUSSELL L.K (1987) : Progrès de la recherche sur les systèmes culturaux. Dans : Les cultures associées au Mali. Communications présentées au séminaire sur les cultures associées au Mali. Co-publiées par IER et ICRISAT, 1987.
27. ALTINE R. (1990) : Performance du mil et du niébé dans les différents systèmes de culture. Rapport de stage, Maîtrise Agronomie générale.
28. GANRY F., GUIRAUD G. and DOMMERGUES Y.. Effect of straw incorporation on the yield and nitrogen balance in the sandy soil-pearl millet cropping system of Senegal. *Plant and Soil* 50 (1978), 647-662.
29. GANRY F. ET GUIRAUD G., 1979. Mode d'application du fumier et bilan azoté dans un système mil-sol sableux du Sénégal. In: *Isotopes and Radiation in research on Soil-Plant relationships* 1979. International Atomic Energy Agency
30. KUNDU D.K AND LADHA J. K. (1995): Enhancing soil nitrogen use and biological

- nitrogen fixation in wetland rice. *Expl. Agric.* 31, 261–277.
31. UHART SA AND RADE FH (1995): Nitrogen and carbon accumulation and remobilization during grain filling in maize under different source/sink ratios. *Crop Sci.* 35:183–190.
 32. RAUN W.AND JOHNSON G.V. (1999): Improving nitrogen use efficiency for cereal production. *Agron. J.* 91, 357–363.
 33. VALKAMA E., SALO T., ESALA M. AND TURTOLA E.: Nitrogen balances and yields of spring cereals as affected by nitrogen fertilization in northern conditions: A meta-analysis. *Agriculture, Ecosystems and Environment* 164 (2013) 1– 13
 34. RUIDISCH M., BARTSCH S., KETTERING J., HUWE B. AND FREI S.: The effect of fertilizer best management practices on nitrate leaching in a plastic mulched ridge cultivation system. *Agriculture, Ecosystems and Environment* 169 (2013) 21– 32.

2.7 Conclusion partielle

Au terme de ces travaux, on présente un certain nombre de résultats qui dégagent des pistes pour l'amélioration de la nutrition hydrique et minérale d'une des principales cultures du Niger, dans des conditions contraignantes. Le problème de l'augmentation de la productivité des cultures dans les zones arides et semi-arides est largement reconnu comme difficile. Ces zones n'ont pas bénéficié de la «révolution verte» autant que les régions d'Asie et d'Amérique Latine, bien dotées en ressources en eau. Les réponses des cultures aux intrants tels que les engrais ont été généralement faibles et non rentables pour l'agriculteur. Une gestion attentive de l'eau et une utilisation judicieuse des engrais sont nécessaires. Il est impératif de mieux comprendre les mécanismes par lesquels les éléments minéraux et l'eau interagissent lorsque les deux sont insuffisants. Ces questions ont été largement abordées dans ce chapitre.

Beaucoup de travaux ont insisté sur une combinaison de la fertilisation chimique avec des pratiques de gestion des cultures qui augmentent l'approvisionnement en eau de la culture (Vanlauwe *et al.*, 2010 ; Vanlauwe *et al.*, 2015 ; Ryan and Sommer, 2010 ; Okalebo *et al.*, 2006). Il s'agit notamment de maximiser l'infiltration des précipitations dans la zone racinaire, de minimiser les pertes d'eau par évaporation du sol et les mauvaises herbes, et de maximiser l'extraction de l'eau du sol par la culture. C'est dans ce cadre que les techniques de scarifiage et branchage avec des résidus organiques locaux ont été testées avec efficacité. La possibilité de réduire la durée de la jachère, tout en augmentant son efficacité en faisant recours à des matériaux divers locaux a été démontrée. La technique de paillage-branchage permet le retour de la fertilité dès la première année sur les glakis incultes de l'ouest nigérien. Au moment où il y a une énorme pression sur la terre due à la démographie galopante et à la désertification, cette technique est un important moyen pour la récupération des terres en voie de dégradation pour l'amélioration de la sécurité alimentaire.

Les travaux sur les impacts de la conversion de l'utilisation des terres, des cultures pluviales strictes aux cultures irriguées augmentent la recharge des nappes en profondeur, mais en même temps le flux de minéraux qui vont avec. Ceci montre que le risque de pollution de ces nappes est réel et commande des précautions particulières pour la protection et l'utilisation durable de ces ressources. En outre, l'approche principale des questions de la sécurité alimentaire au Niger privilégie le développement des cultures irriguées dites « de contre-saison » et la superficie a presque doublé au cours des trois dernières décennies. Mais les exploitations sont en grande majorité de petites tailles (<0,3 ha) et la technique de fertilisation est mal maîtrisée, avec des apports supérieurs à quatre fois les doses normales

recommandées. Ce travail a eu le mérite d'attirer l'attention sur le besoin de recherche d'accompagnement et d'encadrement des petits exploitants agricoles en relation avec le risque de pollution des nappes phréatiques mis en évidence plus haut. Une gestion "durable" de la fertilisation azotée doit conduire à limiter les pertes en profondeur à un niveau acceptable pour l'environnement. Ceci implique nécessairement un équilibre entrées-sorties, en ajustant chaque année la fertilisation à la culture et au rendement escompté. En Afrique au sud du Sahara, la faible intensité agricole fait que ces phénomènes de pertes sont de moindre importance. Cependant, la transformation de l'agriculture (en cours) pour répondre aux besoins d'une population en hausse, appelle un suivi régulier du bilan des éléments minéraux. La pression sur la terre est particulièrement aiguë dans ces régions du monde, et le développement de l'intensification agricole est inévitable, pour répondre aux préoccupations croissantes concernant la sécurité alimentaire (Borlaug 2007). Ainsi, il y a un réel besoin de rationalisation de la fertilisation chimique au niveau de ces régions comme l'a démontré l'article sur l'irrigation et la fertilisation au niveau de la basse vallée de la Tarka. Plusieurs travaux ont montré la nécessité du développement d'une approche de gestion intégrée de l'eau et des éléments minéraux du sol. Banlauwe *et al.* (2010 et 2015) la définissent comme un ensemble de pratiques de gestion de la fertilité des sols qui incluent nécessairement l'utilisation d'engrais, d'amendements organiques et de matériel génétique amélioré, ainsi que des connaissances sur la façon d'adapter ces pratiques aux conditions locales. Le faible rythme d'adoption des nouvelles technologies par les paysans a souvent été souligné (Okalebo *et al.*, 2006), avec comme plus grand handicap la contrainte climatique.

En revanche, chez les cultures pluviales, le bilan minéral montre que la culture du mil et du niébé s'alimente préférentiellement à partir de la maigre réserve en minéraux du sol. Ceci recommande l'amélioration de la capacité de stockage en minéraux de ces sols dunaires, à travers des techniques innovantes qui augmentent les teneurs en éléments fins et en matière organiques. La question de la cherté de l'engrais peut être soulagée par le recours au phosphate naturel local dont la bonne efficacité agronomique a été mise en évidence notamment pour les légumineuses. Il devient donc possible d'améliorer la teneur en matière organique de ces sols nigériens sur la seule base des phosphates naturels, dans un assolement légumineuse-céréale.

**CHAPITRE 3 : CONTRIBUTION A L'AMELIORATION DE LA TOLERANCE A LA
SECHERESSE CHEZ LE MIL**

3.1. Introduction

Un approvisionnement alimentaire fiable et abordable revêt une importance cruciale pour le progrès et la stabilité des sociétés humaines. Au cours du dernier siècle, nous avons assisté à une augmentation extraordinaire des rendements des cultures, en particulier pour les espèces les plus répandues et les plus consommées au monde, comme le riz, le blé, le maïs et le soja. La moitié de cette augmentation de la productivité des cultures est principalement due aux améliorations végétales, et l'autre moitié aux pratiques agronomiques, bien que les deux dépendent les unes des autres. Les principales avancées de l'agronomie dont il s'agit consistent essentiellement au recours aux engrais chimiques dont la valeur réelle ne pouvait être réalisée qu'en présence de variétés appropriées et en l'absence d'autres pressions (concurrence des mauvaises herbes, des ravageurs et des maladies, disponibilité en eau etc.).

Le Niger doit accroître sa production agricole, aussi bien pour garantir la sécurité alimentaire que pour améliorer les revenus des petits agriculteurs pauvres. La plupart des cultures dans les pays en développement ne sont exploitées qu'à 20% de leur potentiel. Ce déficit est dû pour l'essentiel aux stress abiotiques - sols inadaptés, sécheresse - le reste étant imputable aux stress biotiques, c'est-à-dire les maladies, les insectes ravageurs, les plantes adventices et la mauvaise nutrition des plantes. La sélection végétale à elle seule ne suffira pas à combler ce déficit, mais les sélectionneurs peuvent contribuer à augmenter les rendements en mettant au point des variétés améliorées adaptées aux conditions agro-écologiques particulières de chaque zone de production. Un autre problème à affronter est le changement climatique, qui nuira très vraisemblablement à la productivité agricole dans les régions tropicales. Les programmes de sélection devront utiliser tous les outils disponibles pour s'adapter à ces changements. Qui plus est, les régions en développement sont fortement dépendantes des cultures dites orphelines, comme c'est le cas pour le Niger avec le Mil et le sorgho.

L'amélioration de la productivité en situation de sécheresse est un défi majeur pour l'agriculture sahélienne. L'augmentation du rendement des cultures en conditions de sécheresse est difficile en raison de la faible héritabilité du caractère ou du groupe de caractères liés à la tolérance à la sécheresse, de la nature imprévisible des types de sécheresse et de l'insuffisance des travaux sur la compréhension des mécanismes biologiques de tolérance à la sécheresse. De nouvelles approches sont nécessaires pour améliorer la performance des cultivars dans des conditions de sécheresse. Ces différentes questions ont été abordées dans le présent chapitre.

3.2 Radiosensibilité du Mil au rayonnement gamma

Le mil et le niébé sont deux cultures importantes pour la sécurité alimentaire et la lutte contre la pauvreté et la malnutrition au Niger comme dans toutes les régions arides du Sahel. Ces deux cultures sont généralement cultivées en association et ont l'avantage de produire là où d'autres espèces auraient péri. Les changements climatiques en cours orientent vers une accentuation de l'irrégularité des pluies dans la région du Sahel. La nécessité de créer de nouvelles variétés mieux adaptées à ce nouveau contexte climatique est un passage obligé pour la réalisation des Objectifs du Millénaire pour le développement dans sa composante nutrition et santé humaines au Sahel. La méthode de sélection par mutagenèse induite permet de développer de nouvelles variétés de cultures avec de nouveaux phénotypes intéressants. Cette méthode est développée au Niger, au Laboratoire de Biotechnologie et Amélioration des Plantes de l'IRI, pour la mise au point de variétés de mil et de niébé plus tolérantes à la sécheresse et aux températures élevées. Ce travail qui étudie la radio-sensibilité de ces deux espèces aux rayonnements gamma, est une première étape préalable à l'amélioration par mutagenèse induite. Les valeurs de la LD₅₀ (*Letal Dose for 50% Mortality*) obtenues sont de 669,3 Gy pour le mil et de 176,6 et 209,4 Gy respectivement pour les deux variétés de niébé, TN578 et IT90K372-1-2. La LD₅₀ sert de référence pour les doses d'irradiation efficace pour l'induction de la mutagenèse. Ce travail a été publié dans *International J. of Innovation and Applied Studies*; Vol. 4, No Dec. 2013, pp 665-671; **S. Daouda Ousmane, Wilfred Elegba and Kenneth Danso (2013)**. Radiosensibility of pearl millet (*Pennisetum glaucum* (L.) R. Br) and cowpea (*Vigna unguiculata* (L.) Walp).

Radio-sensibility of pearl millet (*Pennisetum glaucum* (L.) R. Br.) and cowpea (*Vigna unguiculata* (L.) Walp.) seeds germination and seedling growth

Sani Daouda Ousmane¹, Wilfred Elegba², and Kenneth Danso²

¹Department of Radio-Agronomy and Ecophysiology,
Biotechnology and plant Breeding Laboratory, Radio-Isotopes Institute, AM University,
Niamey, Niger

²Biotechnology and Plant breeding Section,
Biotechnology and Nuclear Agriculture Research Institute, Ghana Atomic Energy Commission,
Accra (Legon), Ghana

Copyright © 2013 ISSR Journals. This is an open access article distributed under the *Creative Commons Attribution License*, which permits unrestricted use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

ABSTRACT: Millet and cowpea crops are important for food security, poverty alleviation and malnutrition in the arid Sahel. The two crops generally grow together and have the advantage of supporting poor climatic conditions such as drought and low use of inputs which characterize agriculture in the world's least developed countries. Recent climate change raised up the dryness phenomenon and the traditional species cycle of production is no longer adapted to the reduced length of the wet seasons. New early and drought tolerant varieties are needed to ensure a steady supply of food in the driest regions on the planet. As it was done in numerous species, the mutation induced breeding can help to develop new crop varieties in pearl millet and cowpea. This method is carried out in Niger, in the Laboratory of Plant Breeding and Biotechnology to find out varieties of pearl millet and cowpea, more drought and high temperatures tolerant. This work examines the sensitivity of these two species to gamma radiation, as a first prerequisite step, for crop improving using mutation induction technique. The LD50 was found to be 669,3 Gy for millet crop and respectively 176,6 and 209,4 Gy for TN578 and IT90K 372-1-2 cowpea varieties.

KEYWORDS: Pearl millet, cowpea, seeds irradiation, food security, Niger.

1 INTRODUCTION

Millet and cowpea are important crops in Niger. Millet is the staple food of the majority of the Niger population, the cowpea is a source of cash for farmers especially women. These two crops are usually grown in association and have the advantage of producing where other species would have perished. In millet as in cowpea grain productivity is related to the length of the cycle. The most productive varieties are those that have the longest cycle. Recent climate changes result in shortening the duration of the wet season in the Sahel region, making increasingly unsuitable varieties with long vegetative cycle. The need to create new varieties combining productivity and precocity is an obligatory passage for the achievement of the Millennium Development Goals in nutrition and human health in the Sahel component. Conventional breeding has a relatively high cost for closed secondary interest crops like millet and cowpea. It takes 10 to 15 years of experimentation to lead to new varieties. Selection by induced mutation techniques, though it remains uncertain, has the advantage of saving time and ease of implementation. This technique is carried out in Niger, in the Biotechnology and Crop Improvement Laboratory, to increase pearl millet and cowpea crops drought tolerance. This work is a first step, studying the radio-sensitivity of the two species, to determine lethal dosage (LD₅₀) of gamma ray irradiation. It would, then, be used for irradiating and mutation induction breeding.

2 MATERIAL AND METHODS

2.1 SEEDS IRRADIATION

Seeds of two varieties of cowpea (TN578 and IT90K-372-1-2) and one variety of pearl millet (HKP) coming from the Biotechnology and Crop Improvement Laboratory of National Radio-Isotopes Institute were used in this experiment. Gamma ray irradiation took place in the Radiation Technology Center of Ghana Atomic Energy Commission (GAEC), in Accra in November 2012, using Cobalt-60 source. Dry seeds were split in 8 samples (of sixty five grams), each corresponding to one of the seven irradiation treatments 0 (Control), 100, 200, 300, 400, 500, 600 and 700 Gy. All irradiation was done with a rate of 258,8 Gy/h, determined during a preliminary irradiation. After irradiation, seeds were sown, half *in vitro* in Petri dishes, and half in soil in the green house.

2.2 IN VITRO GERMINATION TEST

In vitro germination test was done in Petri dish of 90 mm diameter with cotton wetted with 10 ml of distilled water for pearl millet and 20 mm for cowpea. Each Petri dish received 10 seeds and there were 10 Petri dishes by treatment for pearl millet and one for cowpea. Incubation took place in dark, in a growth room at ambient temperature of 25 to 36°C. The percent of germination was recorded three days after sowing (DAS).

2.3 IN SOIL GERMINATION AND SEEDLING GROWTH

In soil test took place in a green house, on a germination tray for the pearl millet and in PVC pot for the cowpea. The soil used is a mixture of local topsoil and sawdust in a ratio of 2:1 (v/v). Seeds were sown in a small hole of 2 to 4 cm deep after profusely watering, in a complete randomized experiment replicate 48 times for pearl millet and 10 times for cowpea. Spacing was 5 cm from plant to plant in millet and in pot of 10 cm diameter for cowpea. The experiment was irrigated at suitable intervals in such a manner that the crop did not experience with water stress. The data regarding the seedling emergence and plant height were recorded 7 days after sowing. In the result presentation, the seeds controls (with no radiation) were considered as reference (100%) of normal growth.

3 RESULTS AND DISCUSSION

3.1 SEEDS GERMINATION AND SEEDLING LIFTING UP

Data on the effects of different doses of gamma ray on seeds germination were summarized in Table 1. The two species responded differentially to various gamma radiation doses. For millet crop, the average rate of germination obtained *in vitro* is 98,9% and 104,6% in pot, with no significant difference between treatments, *in vitro* so as in soil, however the lower germination value is for the highest radiation dose. On figure 1, we can easily notice no difference between treatments. Germination is not negatively affected by gamma radiation even at high doses. This result is similar to some previous results [1]. Working on *Lepidium sativum* L. with dosages varying between 0 and 800 Gy, they found that gamma radiation affect significantly all observed important traits except germination percentage. It was concluded that the germination percentage is not a good indicator of radio-sensitivity in pearl millet. In soil test, the germination ability seems to be stimulated by all irradiation doses. Only the latest higher dose of 700 Gy showed inhibitory effect. This result was reported by several authors [2], [3]. In pearl millet, effective radiation doses are higher than 600 Gy, whereas previous results worked exclusively on doses under this value [4], [5]. This result should be considered and radiation doses above 700 Gy should be prospected in pearl millet.

Table 1. *In vitro* and *in soil* germination rate of pearl millet and cowpea as affected by radiation doses

Date	CTL	100	200	300	400	500	600	700	Average	STDEV
Pearl millet <i>in vitro</i>	100	101,0	100,0	99	100,0	94,9	98,0	99,0	98,9	1,8
Pearl Millet <i>in soil</i>	100	107,3	104,9	107,3	109,8	102,5	109,8	94,1	104,6	4,8
Cowpea <i>in vitro</i>										
TN578	100	100	100	100	100	80	70	60	88,8	16,4
V2	100	90	90	90	90	70	60	50	80,0	17,7
Cowpea <i>in soil</i>										
TN 578	100	80	140	20	20	60	20	20	57,8	45,9
V2	100	112,5	75	25	25	25	25	12,5	50,0	39,5

Fig. 1. *in vitro* Pearl millet (*Pennisetum glaucum* (L.) R. Br.) germination, three days after incubation, as affected by the dose of seeds' Radiation between 0 to 700 Gy

Instead, cowpea showed mean values of germination rate ranged from 50,0% to 88,8%, with great differences tests and between varieties. In *in vitro* test, inhibitory effects began at higher radiation dose (> 500 Gy), whereas in soil, it started from 300 Gy. The germination rate showed regular decrease with increase in radiation dose. In *in vitro* test, from 100 to 400 Gy, there was no significant effect of radiation. The germination rate began to fall down at 500 Gy, to attend 60% and 50% for TN578 and IT90K respectively at highest dose. In soil test, the inhibitory effect began at 300 Gy and decreased progressively to attend 20% and 12,5% for the highest dose, respectively for TN578 and IT90K varieties (see Figure 2).

Fig. 2. *in vitro* cowpea (*Vigna unguiculata* (L.) Walp.) germination, three days after incubation, as affected by the dose of seeds' Radiation between 0 to 700 Gy

The difference between *in vitro* and *in soil* test indicate that the inhibitory effect affects more the epicotyls and hypocotyls growth (reducing seedling lifting up) than the germination rate.

3.2 SEEDLING GROWTH

Data on the effect of different doses of gamma ray on seedling growth are graphically illustrated in Fig 5 to 8. Lower doses of 200 Gy did not reduce the seedling significantly seedling growth. Higher doses exerted inhibitory effects on seedling growth of both millet and cowpea (Figures 3 and 4). Radiation effect was recorded with higher doses above 300 Gy in pearl millet (Fig 5) and above 200 Gy in cowpea (Fig 7). This response is in great agreement with earlier research findings [4], [6], [7], [5], [8]. This decline in stem height was obtained even in the case of massive inflows of mineral fertilizers [9]. In pearl

Radio-sensibility of pearl millet (*Pennisetum glaucum* (L.) R. Br.) and cowpea (*Vigna unguiculata* (L.) Walp.) seeds germination and seedling growth

millet, plant height decrease progressively, with radiation dose, from 100% of the control, to 40% at the highest dose (700 Gy). In cowpea, the height drop is sharper, from 200 to 300 Gy and plant growth is almost zero beyond 300 Gy. No significant difference was recorded between the two varieties of cowpea.



Fig. 3. Pearl millet (*Pennisetum glaucum* (L.) R. Br.) seedling growth in pot, in green house, three days after sowing, as affected by the dose of seeds' Radiation between 0 to 700 Gy.



Fig. 4. Cowpea (*Vigna unguiculata* (L.) Walp.) Seedling growth in pot, in green house, three days after sowing, as affected by the dose of seeds' Radiation between 0 to 700 Gy.

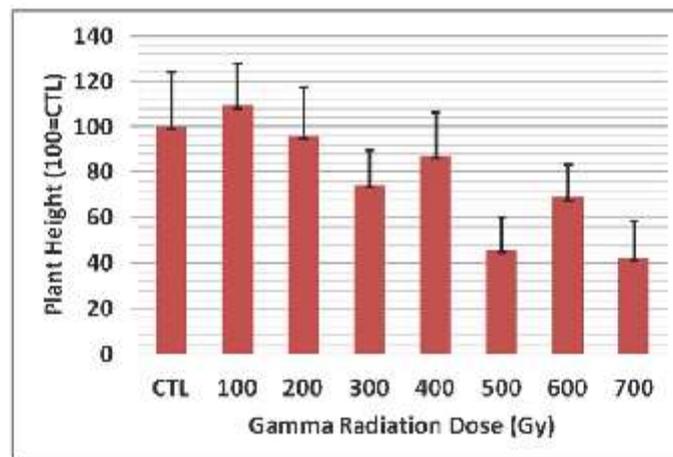


Fig. 5. Pearl Millet (variety HKP) height as affected by gamma radiation dose, 7 days after sowing

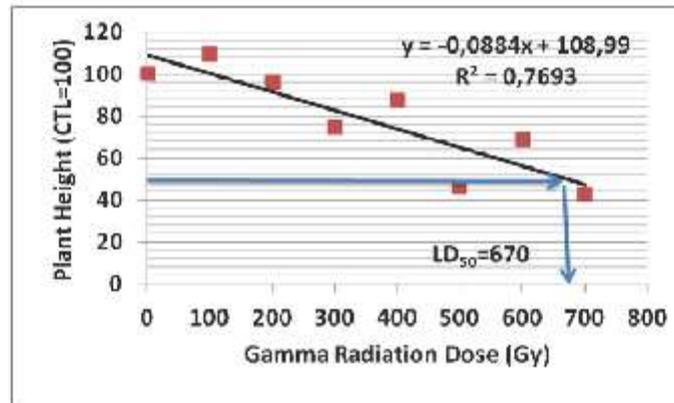


Fig. 6. Pearl Millet (variety HKP) height as affected by gamma radiation dose, 7 days after sowing. LD₅₀ determination

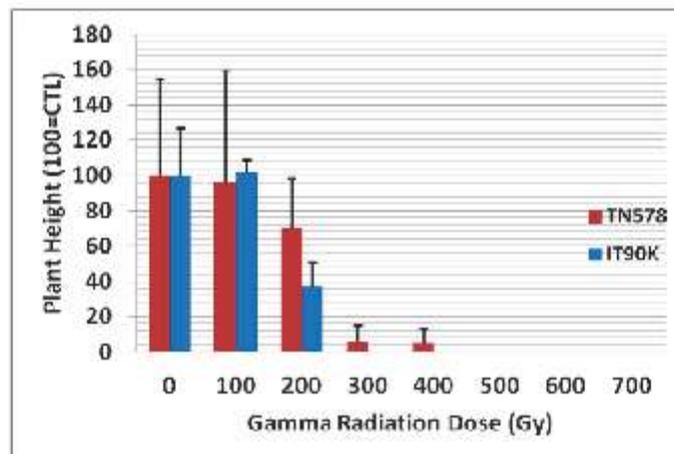


Fig. 7. Cowpea height as affected by gamma radiation dose, 7 days after sowing. Varieties TN578 and IT90K

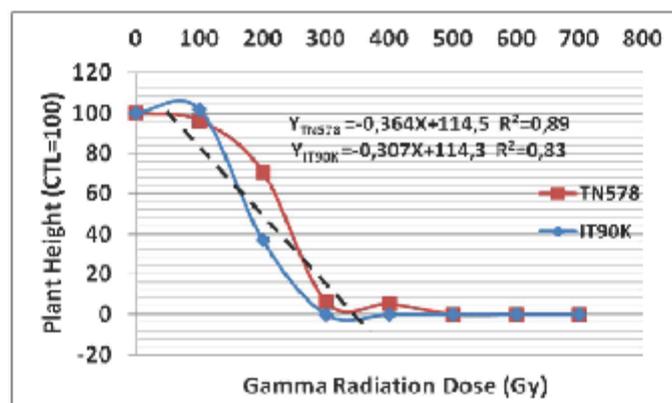


Fig. 8. Cowpea height as affected by gamma radiation dose, 7 days after sowing. Varieties TN578 and IT90K. LD₅₀determination

3.3 LETHAL DOSE OF 50% GROWTH INHIBITION DETERMINATION (LD₅₀)

The results above permit to consider the seedling height as a good indicator of the biological effect of the gamma rays on seeds and seedling growth of pearl millet and cowpea. The data were used to calculate the Lethal Dose for 50% growth inhibition. The radiation doses showed negative correlation with seedling growth (Fig 6 and 8). As expressed in the equations below, regression analysis revealed that the decrease for unit increase in dose was 0,088 in pearl millet, 0,307 in cowpea TN578 and 0,364 in cowpea IT90K, with regression coefficients varying from 0,77 to 0,89.

$$Y_{\text{ML}} = -0,088 X + 108,9 \quad R^2 = 0,77$$

$$Y_{\text{TN578}} = -0,307 X + 114,3 \quad R^2 = 0,83$$

$$Y_{\text{IT90K}} = -0,364 X + 114,3 \quad R^2 = 0,89$$

Where:

Y is the relative growth in percent

X is the radiation dose in Gray

The LD₅₀ is the gamma ray dose expected to produce enough genetic modification to lead to new mutant viable lines. Using the above formula, the LD₅₀ is the X value calculated with Y equal to 50. Obtained values were presented in Table 2 : 669,3 Gy for millet; 209,4 Gy for cowpea TN578 and 176,6 Gy for cowpea IT90K. Recently, some authors [5], working on plant mortality as observed indicator, found LD₅₀ values varying from 599 to 731 Gy for pearl millet. Even the observed indicators were different, the LD₅₀ values obtained were similar for the two experimentations, with different varieties of pearl millet. Anggia [10] working with large game of dosage (0-2000 Gy) on corn, found LD₅₀ mean values ranged from 220 to 615 Gy depending on the variety. Instead, LD₅₀ is variable between cowpea varieties and was to be determined before working on each new variety of this species.

Table 2. Calculated LD50 for pearl millet and Cowpea in Niger

Crop	LD ₅₀ (Gy)
Pearl Millet	
HKP	669,3
Cowpea	
TN578	209,4
IT90K	176,6

4 CONCLUSION

The pattern of seedling growth response of pearl millet and cowpea seeds to gamma ray irradiation has been successfully determined. In addition, LD₅₀ relative to plant height of the tested varieties was found to 669 Gy for millet and ranged from 176 to 209 Gy for cowpea. The stimulation positive effects observed in pearl millet, for all tested doses, suggested to further irradiate this specie with gamma radiation dosages above 700 Gy. In the other hand, our results showed that pearl millet is more tolerant than cowpea to gamma ray radiation.

REFERENCES

- [1] Abdoul-Majeed, A.U.R. Khan, A. Habib and M. Zahir, "Gamma Irradiation Effects on some Growth Parameters of *Lepidium sativum* L.," *ARNP Journal of Agricultural and Biological Science*, vol. 5, no. 1, January 2010.
- [2] H.M. Badr, A.A Alsadon, and A.R. Al-Harbi, "Stimulative Effect of Gamma Radiation on Growth and Yield of Two Tomato (*Lycopersicon esculentum*, Mill) Cultivars," *J. King Saud. Univ. Agric. Science*, vol. 9, no. 2, pp. 277-286, 1997.
- [3] J. Sumira, P. Talap, T. Siddiqi, and Mahmooduzafar, "Gamma radiation effects on growth and yield attributes of *Psoralea corylifolia* L. with reference to enhanced production of psoralen," *Plant Growth Regulation*, vol. 64, no. 2, pp. 163-171, June 2011.
- [4] R.M. Aslam and K.A. Siddiqui, "Cytogenetic studies of variability induced through hybridization and gamma irradiation in *Pennisetum americanum* I. seedling emergence and plant survival in M1 generation," *Pak. J. Bot.*, vol. 11, no. 2, pp. 173-177, 1979.
- [5] L.N. Horn, M.B.A. Chikelou, B. Soleymanne, and S.N.A. Ipinge, "Radiosensitivity studies in pearl millet (*Pennisetum glaucum*), Cowpea (*Vigna unguiculata*) and Sorghum (*Sorghum bicolor*) varieties in Namibia," *AGRICOLA* 2010, pp. 38-40, 2010.
- [6] H. Khizar, A. Khan, M. Sadidg, F. Elahi, and A. Shakoore, "Gamma Radiation Induced Variation in Sorghum Cultivars," *Pakistan J. Agric. Res.*, vol. 11, no. 1, 1990.
- [7] H.N. Abla, M.F. Hashim, N.S. Hassan, and H. Abo-Zaid, "Effect of Gamma Irradiation and Phosphorus on Growth and Oil Production of Chamomile (*Chamomilla recutita* L. Rauschert)," *Int. J. Agri. Biol.*, Vol. 6, No. 5, 2004.
- [8] M.M. Khan, R. Din, M.M. Qasim, N. S. Jehan, and M.M. Iqbal, "Induced Mutability studies for yield and yield related characters in three wheat (*Triticum aestivum* L.) varieties," *Asian Journal of Plant Sciences* 2 (17-24) 1183-1187, 2003.
- [9] F. Subhan, M. Anwar, N. Ahmad, A. Gulzar, A.M. Siddiq, S. Rahman, I. Ahmad, and A. Rauf, "Effect of Gamma Radiation on Growth and Yield of Barley under Different Nitrogen Levels," *Pak. J. Biol. Sci.*, 7(6) : 981-983, 2004.
- [10] E.P. Anggia, D. Fajar, H. Kustanto, and D. Ruswandi, "Study on LD₅₀ of Gamma Rays Irradiation (CO⁶⁰) for mutation of Unpad corn collections," *Zuriat*, Vol. 21, No. 1, January 2010.

3.3. Réponse *in vitro* du mil à la sécheresse

Les récents changements climatiques exacerbent le phénomène de la sécheresse et l'amélioration de la tolérance à la sécheresse du mil est devenue une nécessité actuelle. La présente étude est menée afin de déterminer une méthode de dépistage *in vitro* de nouveaux mutants tolérant la sécheresse. Elle fait suite à la précédente qui a déterminé les valeurs de référence LD₅₀. Ces doses ont été utilisées pour irradier les semences de mil HKP pour obtenir des semences M₀ dont les descendances à partir de F2 sont testées à la recherche de mutation intéressante. Le screening pour la tolérance à la sécheresse se fait grâce au Polyéthylène Glycol (PEG) de poids moléculaire 6000. Cet article présente cette méthode de screening. L'effet de PEG6000, en concentration variant de 0 à 40% (p/v) sur le pourcentage de germination, l'émergence des coléoptiles, la hauteur et le poids frais des feuilles, la longueur et le poids frais des racines ainsi que le rapport feuilles / racine ont été analysés. Les données ont été utilisées pour déterminer la dose létale pour l'inhibition de 50% de la croissance (LD₅₀), qui va être utilisée pour le screening pour la tolérance à la sécheresse. Des différences significatives ont été observées sur tous les paramètres étudiés. La DL₅₀ est de 262 Gy pour le pourcentage de germination et 242 Gy pour l'émergence de coléoptiles.

Ce travail a été publié dans *African J. of Biotechnology*; Vol. 13 (37) pp 3742-3747, 10 sept. 2014; DOI : 10.5897/AJB2013.13514 ; **Daouda Ousmane S. and Mouhamadou Mounkaila B. (2014)** Effect of Polyethylene glycol (PEG) 6000 on germination and seedling growth of pearl millet (*Pennisetum glaucum* (L.) R. Br) and LD₅₀ for *in vitro* screening for drought tolerance;

Full Length Research Paper

Effect of polyethylene glycol (PEG) 6000 on germination and seedling growth of pearl millet [*Pennisetum glaucum* (L.) R. Br.] and LD₅₀ for *in vitro* screening for drought tolerance

DAUDA OUSMANE Sani* and MOUHAMADOU MOUNKAILA Boureima

Biotechnology and Plant Breeding Section, Radio-Isotopes Institute, Abdou Moumouni University, BP 10 727 Niamey-Niger.

Received 24 November 2013; Accepted 3 July, 2014

Millet crop is an important cereal for food security and the fight against poverty and malnutrition in the arid Sahel. It is a staple grain for millions of people in West Africa and India. It has the advantage of tolerating drought-prone environments and low fertility soils. Recent climate change exacerbates the phenomenon of drought; hence, improving pearl millet drought tolerance became a present necessity. The present study was conducted to determine an *in vitro* screening method for drought tolerance, based on the use of polyethylene glycol (PEG) of molecular weight 6000 Da. This experiment was carried out with one millet genotype (HKPH, promoted by the agricultural official services). The effect of PEG6000, with varying concentrations from 0 to 40% (w/v), on germination percentage, coleoptiles emergence, shoot and root length, shoot and root weight and root/shoot ratio were analyzed. Data were used to determine the lethal dose for 50% growth inhibition (LD₅₀), which was applied for drought tolerance screening. Significant differences were observed for all the characters under different PEG concentrations. LD₅₀ was 262 g/L for the germination percentage and 242 g/L for coleoptiles emergence.

Key words: Pearl millet, water stress, polyethylene glycol, LD₅₀.

INTRODUCTION

Of all domesticated cereals, pearl millet is the most drought tolerant plant (Squire et al., 1987; CGIAR, 2006), with high quality grain. It is the main crop cultivated in the difficult agronomic conditions of the semi-arid tropics of Africa and Asia and contribute to the diet of millions of people (Andrews and Bramel-Cox, 1984; Kumar, 1989).

The productivity in this arid zone is very low, due to the low and erratic rainfall. Given the rapid increase in population in this zone, there is a need for breeding drought tolerant varieties.

Uncertainty of rainfall is critical especially at the beginning of the cycle, after crop emergence. The chal-

*Corresponding author. E-mail: dsani@yahoo.fr. Tel: +227 36 227 287. Fax: +227 20 31 8852.

All rights reserved. This article remains permanently open access under the terms of the [Creative Commons Attribution License 4.0 International License](http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/).

Table 1. Pearl millet seed germination percentage as affected by polyethylene glycol (PEG) 6000 three days after incubation.

Treatment	Germination %	Coleoptiles emergence%
PEG 6000 (bars):		
Control (0.0)	98 ^a ± 3.2	94 ^a ± 5.2
10.0% (-1.0)	95 ^a ± 5.3	92 ^a ± 6.2
20.0% (-3.3)	92 ^a ± 5.2	89 ^a ± 12.0
30.0% (-6.4)	50 ^b ± 10.3	7 ^c ± 0.8
52.5% (-9.5)	7 ^c ± 1.0	0 ^c ± 0
35.0% (-1.3)	8 ^c ± 1.0	0 ^c ± 0
37.5% (-2.9)	2 ^d ± 0.4	0 ^c ± 0
40.0% (-4.7)	2 ^d ± 0.0	0 ^c ± 0

In the same column, values with the same letter are not significantly different (Newman and Keuls Test at 5% level).

lenge is to obtain seed that have a high production capacity, in a short period of time after germination and that develop adequate root biomass to colonize deeper soil layers. Drought constitutes one of the most important environmental stress factors limiting plant growth (Sivakumar, 1992). Large areas of drylands are threatened unproductive due to human activities and recent unfavorable climate change. In order to cultivate plants in such countries, attempts have been made (Saidou, 2011) to develop water stress tolerant lines.

Millet is one of the best stress tolerant plants in the world (CRISAT, 1987). It is the staple crop of 30 million populations in the dry region of the Sahel and in India. Due to climate change, increasing drought is responsible of significant fraction of yield loss. Breeding and production of improved varieties well adapted to new heavy water stress are urgent requirement. Polyethylene glycol (PEG) of high molecular weight has long been used to simulate water stress in plant growth as described by previous works (Kautmann and Eckard, 1978; Izzi et al., 2003; Zgalla et al., 2007; Kouakou et al., 2008; Fan et al., 2012). The aim of this work is to measure the effect of PEG on germination and seedling growth of pearl millet, to determine the LD₅₀ to be used for screening for drought tolerance.

MATERIALS AND METHODS

The experimental material used was pearl millet, genotype PKP, a cultivar bred by the National Agronomic Research Institute, for its efficient, interesting late (Relatively early cycle, good performance, medium tillering, medium cob and large seed). Seeds (mature embryos) were obtained from the Biotechnology and Crop Improvement Laboratory of the National Radio Isotopes Institute of the University of Niamey. The experiment was conducted during April to May 2011, in the Plant Biotechnology laboratory of ULB University of Brussels. Water stress was applied using seven concentrations of PEG6000, corresponding to -1.0; -3.7; -6.0; -8.6; -11.3; -13.0 and -14.7 bars of water potential. These water potential were obtained by adding in 1000 ml of deionized pure water,

respectively, 100; 200; 300; 325; 350; 375 and 400 g of PEG6000 following the method of Loxton (1970) and Michel (1983).

Seeds were surface sterilized by soaking them first in 70% alcohol for 30 s, and then in 5% calcium hypochlorite for 10 min. Seeds were finally rinsed five times with pure sterile water. Sterilized seeds were germinated in Petri dishes (90 mm diameter) on filter paper soaked with 2 ml of the different concentrations of PEG6000 with 10 seeds per Petri dish. To reduce moist evaporation, the Petri dishes were sealed with sterilized Parafilm. Each Petri dish is a repetition and there are 10 replicates per dose of PEG. The incubation took place in one work continuously in darkness, at approximately 37°C to simulate the natural conditions of pearl millet seeds germination even though it was reported that germination percentage is optimal at 25 to 30°C for *P. glaucum* (Mortlock and Vandertop, 1989). Polyethylene glycol of high molecular weight is inert non-ionic. They are small enough to influence the osmotic potential, but large enough to not be absorbed by plant. They could lower the osmotic potential of the nutrient solution without been taken up or been of cytotoxic (Loxton, 1970).

Germination percentage was recorded at the third day of incubation. Root and coleoptiles length as well as their respective weights were evaluated after seven days of culture. A seed is recorded as germinated when the root is visible and at least 1 mm in length.

The experiment layout was a randomized complete design with one factor, PEG6000 concentration, with 10 replications. Data were analyzed with one factor analysis of variance (ANOVA) with exact (2007) and means were separated with Newman and Keuls test at 5%.

RESULTS

PEG and germination percentage

Water stress induced by PEG had significant effects on both the seed germination and the seedling emergence (Table 1, Figures 1 and 2). The germination percentage varied between 0% for the highest dosage (40% PEG = -14.7 bars) to 98% for the control (0 bar). Low PEG dosages (0; 10 and 20%) did not have any significant effect on the germination percentage of the pearl millet seeds, while high dosages of 30 to 40% negatively affected seed germination percentage.

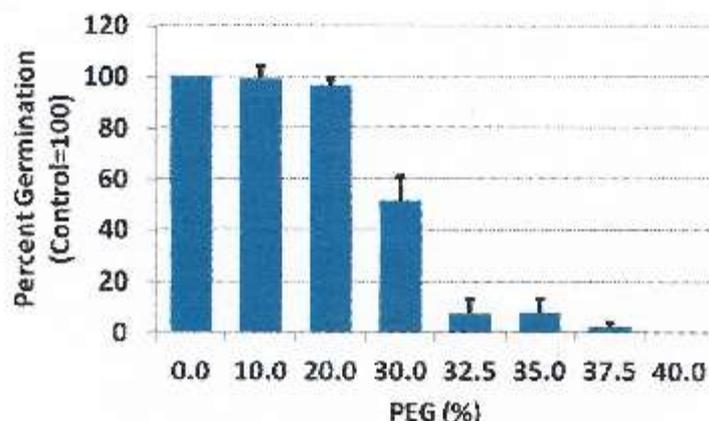


Figure 1. Effects of water stress induced by Polyethylene Glycol (PEG) 6000 on germination percentage in pearl millet. The control (free water) is taken as 100% germination.

Table 2. Pearl millet shoot and root length and weight and root:shoot ratio as affected by Polyethylene Glycol (PEG) 6000 Seven days after incubation

Treatment	Shoot length (cm)	Root length (cm)	Shoot Weight (g)	Root Weight (g)	Root/Shoot ratio(w/w)
PEG6000 (bars)					
Control (0.0)	7.86 ^a ± 0.7	14.4 ^a ± 1.1	38.3 ^a ± 5.4	12.0 ^a ± 5.6	0.54 ^a ± 0.15
10% (-1.0)	5.17 ^b ± 0.4	15.6 ^a ± 1.2	25.2 ^b ± 1.0	15.8 ^b ± 4.5	2.60 ^b ± 0.20
20% (-3.9)	3.24 ^c ± 0.3	7.8 ^b ± 1.6	11.1 ^c ± 1.9	13.0 ^c ± 4.5	1.16 ^c ± 0.35
Probability/sign	0.013	0.029	<0.0001	ns	<0.0001

In the same column, values with the same letter are not significantly different (Newman and Keuls Test at 5% probability level).

PEG and root length

At 10% PEG the root length was significantly higher than at 20% PEG. The higher concentrations caused a slower development of root (Table 2). Low concentrations of PEG induced a rhizo stimulation. The mean root length varied from 7.9 cm for the high PEG concentration (20%) to 15.6 cm for the low dosage of PEG.

PEG and shoot length

There was no shoot and root emission above 20% PEG and analysis of seedling shoot growth was restricted to the two doses 10 and 20% compared to control (Table 2). Shoot length was significantly lower with an increase in PEG concentration. Shoot length showed reduced values from 7.86 cm for the control to 3.24 cm for the highest concentration (20%).

PEG and root weight

Comparable growth was observed between control, 100 and 200 g/l concentrations of PEG (Table 2). Root weight was not significantly influenced by the treatments between 0 and 200 g/l. The decline in root length with an increase in PEG concentration did not have an effect on the root weight. This means that the roots might have lost volume or became thinner with an increasing in PEG concentration.

PEG and shoot weight

Mean shoot fresh weight varied significantly from 38.3 g for control (0.0 bar) to 11.1 g for 20% PEG concentration (-3.9 bar). Shoot fresh weight was significantly lower with an increasing in PEG concentration (Table 2). The decrease in water potential by increasing the PEG

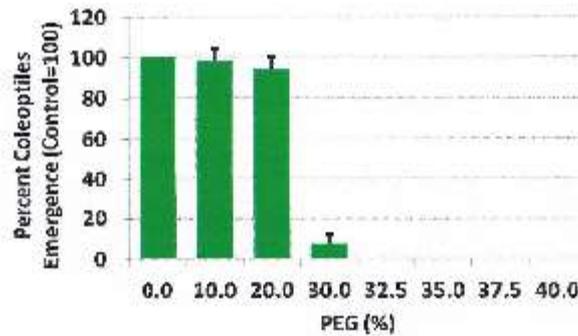


Figure 2. Effects of water stress induced by polyethylene glycol (PEG) 8000 to emergence percentage in pearl millet. The control (free water) is taken as 100% emergence.

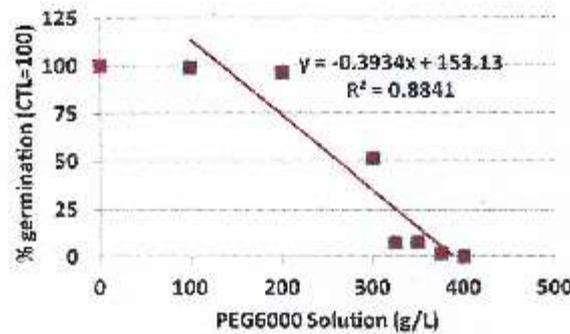


Figure 3. Pearl millet germination percentage as affected by Polyethylene Glycol (PEG) of molecular weight 8000, three days after incubation. LD₅₀ determination.

concentration had similar effects on the shoot length and shoot fresh weight. Results showed that the shoots were more sensitive to PEG concentration than the roots; however in field conditions the roots were the first to detect the water stress and to initiate the first signal.

PEG and root/shoot ratio

The root/shoot ratio ranged from 0.34 (ww) for the control to 1.16 (ww) for the highest PEG concentration (20%) and showed an increase with an increase in PEG concentration. This result shows that the shoot was more sensitive to water deficit induced by PEG.

Lethal Dose of 50% growth inhibition determination (LD₅₀)

The data concerning germination percentage and coleoptiles emergence were used to calculate the Lethal Dose for 50% growth inhibition. This value was used as screening criteria for drought tolerance in pearl millet crop. The germination percentage as well as the coleoptiles emergence showed negative correlation with increasing concentration of PEG8000 (Figures 3 and 4). Regression analyses revealed that for every one unit increase in dose, germination percentage decreased with 0.393 units while coleoptiles emergence decreased with 0.483 units. The determination coefficients (R²) were 0.88

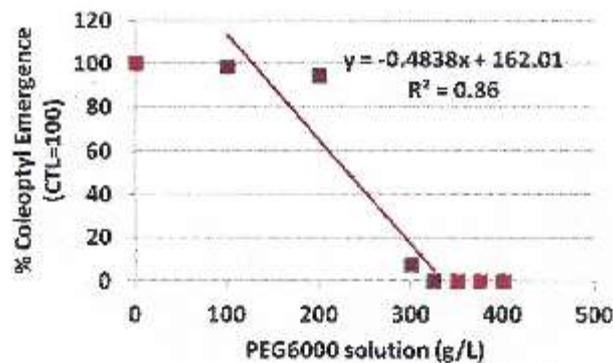


Figure 4. Pearl millet coleoptiles emergence percentage as affected by Polyethylene Glycol (PEG) of molecular weight 6000, seven days after incubation. LD₅₀ determinant.

and 0.86 for germination percentage and coleoptiles emergence respectively.

$$Y_{\text{germ}} = -0.393 X + 151.1$$

$$Y_{\text{CTL}} = -0.483 X + 162.0$$

Where

Y is the relative growth in percent
X is the PEG6000 concentration in % (g PEG/100 g water).

Using the above formula, the LD₅₀ is the X value calculated for Y equal to 50. The values obtained were: 262 g/L for germination percentage and 242 g/L for coleoptiles emergence. These values indicated the concentrations of PEG6000 that would induce a reduction of 50% in germination and emergence of coleoptiles. The principle of screening is to identify lines or varieties with germination and emergence percentages above 50% with the LD₅₀. In this study, the results allowed us to screen for drought tolerant mutants of pearl millet obtained by gamma irradiation mutation induction techniques.

DISCUSSION

Low PEG dosages (0, 10 and 20%) did not have any significant effect on the germination percentage of pearl millet seeds, while higher dosages (30 to 40%) negatively affected germination. This result was in agreement with several previous reports (Van Der Weerd et al., 2002;

Radouane, 2007; Jarsian and Ghobadi, 2008; Govindaraj et al., 2010). At 30% PEG, the germination rate was reduced to 50% compared to the control, it was below 10% with PEG concentrations above 30%. At a high PEG dosage (40%), there was no germination. Water hydraulic conductivity is too low and germination process was strongly reduced. The upper limit of the physiological activities (pF < 2) is perhaps reached. However, working on Tunisian ecotypes of pearl millet, Radhouane (2007) reported more than 50% germination with a high concentration of PEG (equivalent of -2 MPa = 20 bars).

As described by previous authors (Peske et al., 2010), pearl millet seeds emit primary roots at 33% water contents and the PFC effect is delaying the imbibition process. For the potential of -12 bars and below, the seeds did not absorb more than 28% water, and thus, did not emit primary roots. Our observations are consistent with these results.

In the case of drought conditions, the most powerful root system is one that will increase its volume to allow a better exploitation of deep water reserves (Ousmane, 1936). Thus, root length and weight are important determinants for the choice of cultivar for dryland conditions. In this study, the root length was significantly increased at 10% PEG concentration (-1 bar) compared to the control, but was significantly lower when the concentration increased to 20%. The low concentration of PFC induced a rhizo-stimulation as described by several authors on different growth parameters (Badr et al., 1997; Radouane, 2007; Majeed et al., 2010; Horn et al., 2010; Sumira et al., 2011). This result suggested that a moderate concentration of PEG6000 can be used as root growth regulator in *in vitro* tissue culture.

The effect of low doses of PEG observed for root length was not the same for shoot growth. In this study, the extension of the root system has not a positive effect on the growth of shoot. But in soil conditions, root system could extend to deeper and wetter zones and therefore better support plant growth (Ousmane et al., 1993). This is not evident *in vitro* culture where water and nutrients are homogeneous throughout the Petri dish.

The root/shoot ratio showed comparable root and shoots growth in normal conditions and in water stress situation. This study revealed a significant increase in the root/shoot ratio with increasing PEG concentration. Root growth was maintained against osmotic potential increment. This indicated that the physiological activity of the root system is less sensitive to low relative water content; but sap transfer to leaves require higher water potentials.

Conclusion

While confirming previous results on the reactions of a plant against water stress, this study showed that PEG of molecular weight 6000 can be used as an *in vitro* simulator of water stress for pearl millet. It was particularly shown that the growth rate of pearl millet root could be maintained at relatively low water potentials (-3.0 bars), while the sap transfer to plant shoot is strongly inhibited. However, this needs further investigation in order to determine if there is any genotypic effect at this level. In addition, the LD₅₀ values established for germination percentage and coleoptiles emergence will be used for screening for drought tolerance in pearl millet mutants obtained by induced mutation techniques in a future study.

Conflict of interests

The author(s) have not declared any conflict of interests.

REFERENCES

Andrews LJ, Hambl-Cook P (1994). Breeding cultivars for sustainable crop production in low-input dryland agriculture in the tropics. In: D.A. Huxton (ed.), Chapter 28, p. 211-222., Int. Comp. Ser. I, CISA, Madison, W.

Ladr HM, Assafou AA, Aghbari AK (1997). Stimulative Effect of Gamma Radiation on Growth and Yield of Two Tomato (*Solanum lycopersicon* L.) Cultivars. J. King Saud. Univ. Agric. Sci. 9(2):277-288.

CGIAR (Consultative Group on International Agricultural Research) (2000). Pearl Millet: A Hardy Staple for the World's Drylands. CGIAR Story of the Month June 2006.

Fan G, Li Z, Hu J, Niu B, Huang J, Yao T (2012). Effects of polyethylene glycol 6000 and riboflavin phosphate on 300000-base pair in the aquatic two-phase systems using response surface methodology. Afr. J. Food Sci. 6(4):85-90.

Farhan A, Ghobadi ME (2003). Effects of PEG and NaCl Stress on Two Cultivars of Corn (286 Aigu L.) at Germination and Early Seeding Stages. World Acad. Sci. Eng. Technol. 37:392-395.

Gavdani M, Shariqigamesan F, Smaili P, Muthiah AH (2010). Simple, Rapid and Cost-Effective Screening Method For Drought Resistant Breeding in Pearl Millet. Electronic J. Plant Breed 1(1):590-599.

Hern LN, Chheda MBA, Soleymame U, Irigoien SNA (2010). Radiosensitivity studies in pearl millet (*Pennisetum glaucum*), Cowpea (*Vigna unguiculata*) and Sorghum (*Sorghum bicolor*) varieties in Namibia. AGRICOLA 2010, pp. 34-40.

ICRISAT (International Crops Research Institute for the Semi-Arid Tropics) (1987). Proceedings of the International Pearl Millet Workshop, 7-11 April 1986. ICRISAT Center, India, Patancheru, A.P. 502 324, India. ICRSAT.

Kaulforn MK, Eckard AV (1978). Evaluation of water stress control in Polyethylene Glycol by analysis of germination. Plant Physiol. 47:453-8.

Kouakou IH, Kana M, Koné D, Kouadio Y, et Zoucou M (2008). Réponse physiologique au stress hydrique du génotype B420 2100 de *Pennisetum glaucum* L. au déficit hydrique induit par le polyéthylène glycol. Sol. Nat. 5(1):61-67.

Kumar AK (1985). Pearl millet: current status and future potential. *Indian Agric* 18:46-53.

Leahy DW (1972). Absorption of PEG by plant and their effects on plant growth. *New Phytol* 69:501-10.

Majeed A, Khan AJR, Ahmad H, Muhammad Z (2010). Gamma radiation effects on some growth parameters of *Pennisetum glaucum* L. *ARPN J. Agric Biol Sci* 5(1):35-42.

Mehel BE (1953). Evaluation of the water potential of Polyethylene Glycol. *Plant Physiol* 72:66-70.

Mulhock JY, Vandana R (1988). Germination and Establishment of Pearl Millet and Sorghum of different seed qualities under controlled high temperature environments. *Field Crops Res*. 22(3): 95-209.

Ousmane SD (1990). Comportement hydrique de cultures de mil (*Pennisetum glaucum*) en conditions agroclimatiques contraignantes: marches de la perte entière à un stress hydrique post-floreal. Thèse de Doctorat, Ecole Nationale Supérieure Agronomique de Rennes, septembre 1990, 200p.

Ousmane SD, Rebel E, Mauri P (1995). Role du système racinaire dans la résistance à la sécheresse du mil. Analyse de la morphogène post-floreal. In: Mts d'Amara, *Thèses générales et agronomiques sénégalaises et étrangères pour l'année scolaire générale et technique*. Collection colloques et séminaires de l'INSTITUT, ORSTOM, 1995.

Teske FU, Donato A, Coelho I (2010). Condicionamento fisiológico de Sementes de Milheto. *Rev. Bras. Sementes* 32(4): 137-142.

Tadcuia M (2007). Response of Tunisian autochthonous pearl millet (*Pennisetum glaucum* L.) R. Br.) to drought stress induced by polyethylene glycol (PEG) 6000. *Int. J. Electrol* 6(8):1102-1105.

Sadou M (2011). Phénotypologie évolution et caractérisation de gènes impliqués dans l'adaptation du mil (*Pennisetum glaucum* L., R. Br.) aux changements climatiques. PhD dissertation, SupAgro Montpellier, France & Université Abdou Moumouni, Niamey Niger.

Scure GH, Ong BK, Moulali JL (1987). Crop growth in semi-arid environments. ICRSAT Center India, Hyderabad, pp. 218-231.

Sunna J, Isat P, Khatib T, Mahmoodzadeh (2011). Gamma radiation effects on growth and yield attributes of *Pennisetum polycoides* L. with tolerance to enhanced production of protein. *Plant Growth Regul.* 64(2):163-171.

Tan M, Benich A, Halou B (2008). Effet du polyéthylène glycol sur la germination et la croissance in vitro de l'argenter (Argemone siliqua L. Skeels) des Herbes-Rueses (Maroc ancien). *Science et changements planétaires-Sécheresse Volume 14*, Numéro 1, 23 p., Janvier 2008.

Van Der Walder I, Claessens MMA, Cilde S, Van As G (2007). Nuclear magnetic resonance imaging of membrane permeability changes in plants during osmotic stress. *Plant Cell Environ*. 29(11):1538-1549.

Zgheib H, Slette K, Lemaire R (2007). Etude des caractères morphologiques des plantes de tréfle soumises à un déficit hydrique en milieu hydroponique. Etude des caractères morphologiques des plantes de tréfle soumise à un déficit hydrique en milieu hydroponique. *Sécheresse* 2007; 19(1): 67-84.

3.4. Conclusion partielle

Ces travaux ont permis de parachever la mise au point méthodologique pour la mise en œuvre de l'amélioration par mutagenèse induite des principales cultures du Niger. La LD₅₀ a permis de déterminer la dose efficace d'irradiation gamma (pour induire la mutation) sur les semences sèches de mil et niébé. La méthode de screening permet d'identifier les mutants tolérant la sécheresse. Ces deux méthodes peuvent être adaptées à d'autres cultures et à d'autres caractères que la sécheresse.

4. CONCLUSION GENERALE ET PERSPECTIVES

Le plus grand défi auquel doit répondre la recherche est la façon d'améliorer les principales cultures de base afin d'accroître la sécurité alimentaire et la résilience des populations dans les régions arides et semi-arides. Les agriculteurs sahéliens ont souvent un espace limité pour l'agriculture, des revenus très faibles et un accès restreint aux intrants comme les engrais chimiques, les semences améliorées et les pesticides. L'agriculture se pratique au Niger sur des sols sablonneux peu fertiles, avec des pluies faibles et irrégulières et des températures de surface du sol excessives. Cette combinaison de limites rend difficile pour les agriculteurs de subsister, et presque impossible de se procurer un revenu par les produits de leurs récoltes. Le mil est l'une des rares cultures à produire, sans grande rentabilité, quelques graines comestibles dans ces conditions. Mais la tendance des changements climatiques à accentuer ces difficultés rend très préoccupante la survie d'un tel système.

La rareté de l'eau est une contrainte environnementale sévère à la productivité des Végétaux. La perte de récolte induite par la sécheresse dépasse probablement les autres sources de pertes (Farooq *et al.*, 2009). Les travaux présentés à travers cette synthèse montrent une contribution significative pour la description des principaux mécanismes de tolérance à la sécheresse chez le mil, sur la base morphologique et agro-physiologique, ainsi qu'un certain nombre de pistes agro-culturelles pour renforcer cette tolérance. Différentes stratégies de réactions ont été proposées pour expliquer le comportement des deux formes tolérante et sensible identifiées par rapport au stress hydrique de fin de cycle et de longue durée. Elles montrent que la différence génotypique au niveau de la productivité face au stress hydrique terminal est liée à la résultante d'un grand nombre de petits effets qui s'additionnent dans le même sens. Ceci soutient en son temps, la thèse de la gouvernance polygénique de la tolérance à la sécheresse chez le mil (Reynolds & Tuberosa, 2008).

La relativité de la réaction de la plante en fonction du type de stress hydrique a été largement démontrée. La forte variabilité des types de stress (calendrier, durée et intensité) ainsi que d'autres facteurs environnementaux, et la pléthore de gènes qui interagissent entre eux, compliquent le travail pour le sélectionneur (Francia *et al.*, 2005).

Dans le cas du stress hydrique terminal et de longue durée, le maintien de la surface foliaire verte (en retardant la sénescence), l'orientation des assimilats vers, ou les racines (extension du système racinaire) ou les épis (sauvegarde du rendement grain) ont permis de comprendre l'antagonisme de comportement des deux variétés IC30 et HKP. La stratégie d'extension du système racinaire a montré ses limites en cas de stress hydrique de longue durée. Ceci nous a permis d'orienter la réflexion vers l'innovation de pratiques culturelles

comme pistes d'amélioration de l'efficacité des réactions du mil face à la sécheresse dans le contexte nigérien. Il s'agit des pratiques concourant à maximiser l'infiltration des eaux des précipitations dans la zone racinaire, et minimiser les pertes d'eau et d'éléments minéraux par drainage profond, et à étendre la fertilisation au-delà de l'horizon 0-20 cm du sol.

La sécheresse est le stress environnemental le plus impactant pour l'agriculture mondiale. Améliorer les rendements des cultures en milieu aride est un grand défi pour les sélectionneurs et la recherche scientifique. Aujourd'hui, il y a encore un important GAP entre les rendements potentiels et ceux observés en conditions réelles dans les environnements secs (Cattivelli *et al.*, 2008). Au vu de la tendance des changements climatiques à exacerber les périodes de sécheresse et l'élévation des températures, on peut affirmer que la réduction de ce GAP et la stabilisation des rendements agricoles, sont les meilleures stratégies pour garantir l'alimentation des populations croissantes des régions arides et semi-arides de la planète.

La tolérance à la sécheresse des plantes est un mécanisme très complexe et le progrès dans le domaine est très rude et très coûteux. Bien que le problème des sécheresses ait été l'une des principales préoccupations pendant plusieurs décennies, la sélection végétale traditionnelle pour la tolérance au déficit hydrique a été plutôt inefficace. La complexité du stress lui-même, son imprévisibilité et son interaction avec d'autres stress abiotiques et biotiques en sont les principales raisons. Les nouvelles variétés développées ne sont supérieures que dans des conditions favorables (Ceccarelli & Grando, 1996).

La plante doit se protéger des effets du stress en modifiant considérablement son métabolisme tout en essayant de maintenir sa croissance et son potentiel de production. Il existe de nombreuses réactions des plantes comme adaptation au stress hydrique et elles reposent sur des mécanismes cellulaires complexes impliquant de nombreuses protéines et gènes. Il est important de comprendre que chacun de ces mécanismes peut être considéré comme un domaine de recherche possible, et que les gènes identifiés comme intervenant au sein de ces mécanismes sont tous, des gènes candidats potentiels dans l'amélioration génétique de la tolérance à la sécheresse.

Les meilleures perspectives découleraient d'une approche multidisciplinaire avec : (i) l'Agro-physiologie végétale pour le développement de nouveaux outils pour mieux comprendre les interrelations entre les caractères liés à la sécheresse; (ii) la génétique moléculaire pour l'identification de nouveaux QTL liés au rendement (ou à ces composantes) et de bonne héritabilité, en condition de sécheresse et l'expression de caractères liés à la tolérance à la sécheresse, (iii) la biologie moléculaire pour l'identification de gènes utiles soit comme séquences candidates pour disséquer des QTL, soit pour une approche transgénique.

Il s'agira en terme de perspectives de :

1. Constituer une base génétique la plus large possible pour utiliser la variabilité génétique pour l'amélioration de la productivité du mil en condition contraignante de stress hydrique;
2. Approfondir la compréhension des mécanismes cellulaires et physiologiques à la base du fonctionnement des plantes de mil en situation de stress hydrique;
3. Développer une approche génomique pour mieux identifier les gènes majeurs impliqués dans la tolérance à la sécheresse;
4. Initier des méthodes d'identification de marqueurs moléculaires favorables au caractère de tolérance à la sécheresse chez le mil et éventuellement de leur utilisation dans la sélection;

**PARTIE III : FORMATION-ACTIVITES INSTITUTIONNELLES ET
PEDAGOGIQUES**

CHAPITRE 4 : CURRICULUM VITAE DETAILLE

DAOUDA OUSMANE Sani

Laboratoire de Biotechnologie et Amélioration des Plantes, Département de Radio-Agronomie, Institut des Radio-Isotopes, Université Abdou Moumouni de Niamey, BP 10727 Niamey Niger

Tél. : +227 96297297/+227 21797676; Fax +227 20315862; dsaniri@yahoo.fr

Né vers 1960 à Matamèye

Nationalité Nigérienne

Marié père de 6 enfants

4.1 Fonction actuelle

Enseignant-Chercheur, depuis 1997, Chargé de Recherche à l'Université de Niamey, grade homologué en Juillet 2013 par le Conseil Africain et Malgache pour l'Enseignement Supérieur (CAMES).

4.2 Responsabilité et Mandat électif

- ✚ Chef du Département de Radio-Agronomie (1997-2016), mandat électif de 2 ans renouvelable ;
- ✚ Vice-Directeur de l'Institut des Radio-Isotopes (2011-2014), mandat électif de 3 ans renouvelable 1 fois ;
- ✚ Coordonnateur National AFRA (2012-2015), African Regional Agreement for Nuclear Sciences and Technology, au titre de la République du Niger, auprès de l'Agence Internationale pour l'Energie Atomique (AIEA)
- ✚ Président du Concours de l'Agriculture pour le Salon de l'Agriculture, de l'Hydraulique et de l'Elevage (SAHEL), éditions 2014, 2015 et 2017
- ✚ Membre du Conseil de l'Université au titre de représentant des chercheurs (1997-2012), mandat électif de 3 ans renouvelable
- ✚ Responsable exécutif du Laboratoire de Biotechnologie et Amélioration des Plantes

4.3 Domaines de Recherche :

- ✚ Etude des interrelations « sol-plante-Atmosphère » en conditions contraignantes
- ✚ Amélioration des plantes pour la tolérance aux contraintes abiotiques.

4.4 Rayonnement scientifique

- ✚ Organisation d'Atelier
- ✚ Expertise élaboration de projets de développement en Zones Arides
- ✚ Expertise Elaboration de programme de Développement pour le Conseil National de l'Environnement pour un Développement Durable : « Opérationnalisation de la Stratégie du Développement Rural »
- ✚ Expertise dans l'accompagnement des projets de développement : Projet ELMEKI, Projet Basse Vallée de la Tarka, etc.

4.5 Formation

- 1977-1980** **BACCALAUREAT C (mathématiques sciences physiques).** Lycée national de Tahoua, Niger ;
- 1980-1982** **DUES AGRONOMIE GENERALE,** Faculté des Sciences, Université ABDOU MOUMOUNI de Niamey ;
- 1982-1985** **MAITRISE AGRONOMIE GENERALE,** Faculté d'Agronomie, Université ABDOU MOUMOUNI de Niamey ;
- 1985-1986** **INGENIEUR AGRONOME,** Faculté d'Agronomie de l'Université ABDOU MOUMOUNI de Niamey en relation avec l'Ecole Nationale Supérieure Agronomique de Rennes (ENSAR) ;
- 1985-1987** **DIPLOME D'AGRONOMIE APPROFONDIE (DAA) Hydraulique et Climatologie Agricoles,** Ecole Nationale Supérieure Agronomique de Rennes, France ;
- 1991-1996** **DOCTORAT UNIQUE, GENIE RURAL ET DES PROCEDES,** Ecole Nationale Supérieure Agronomique de Rennes, France.

4.6 Encadrement de Recherche

(1) **M. KOULOUAR Kébé** « *Etude de l'Amélioration de l'Alimentation Hydrique et Minérale (azote et phosphore) du mil par l'introduction du niébé en culture pure ou en association* ». **Maîtrise d'Agronomie Générale**; Faculté d'Agronomie, Université Abdou Moumouni, Niamey Niger; **1997** ;

(2) **M^{elle} SEYNI Hadiza** « *Test d'un Polymère Organique Industriel (CMT) sur la Croissance et les Rendements du Mil en Plein Champ* ». **Maîtrise d'Agronomie Générale**; Faculté d'Agronomie, Université Abdou Moumouni, Niamey Niger; **2002** ;

(3) **M. SEYNI DOUNDOU Bouboucar** « *Caractérisation Agromorphologique en parcelles expérimentales de nouveaux géotypes de mil issus d'une mutagenèse par irradiation gamma d'un lot de semences HKP* ». **Ingénieur des Techniques Agricoles**; Faculté d'Agronomie, Université Abdou Moumouni, Niamey Niger; **13/03/2008** ;

(4) **M. MOUNKAILA BOUREIMA Mouhamadou** « *Caractérisation Agromorphologique en parcelle expérimentale de nouveaux géotypes de mil issus d'une mutagenèse par irradiation gamma d'un lot de semences HK* ». **Ingénieur des Techniques Agricoles**; Faculté d'Agronomie, Université Abdou Moumouni, Niamey Niger; **13/03/2008** ;

(5) **M. HASSANE ZOUMBEY Kader** « *Evaluation de la faisabilité socio Technique et Economique de la production et diffusion de nouvelles semences de mil mutagènes* ». **Ingénieur des Techniques Agricoles**; Faculté d'Agronomie, Université Abdou Moumouni, Niamey Niger; **14/03/2008** ;

(6) **M. AMADOU Sadou** « *Evaluation avancée de lignées de mil descendantes d'une irradiation gamma* ». **Ingénieur des Techniques Agricoles**; Faculté d'Agronomie, Université Abdou Moumouni, Niamey Niger; **03/2009** ;

(7) **M. LIMAN HAROU Issoufou** « *Caractérisation en parcelles expérimentales de l'hétérogénéité agro-morphologique d'un lot de semences de mil HKP* ». **Ingénieur des Techniques Agricoles**; Faculté d'Agronomie, Université Abdou Moumouni, Niamey Niger;

03/2009 ;

(8) M. GADO SABO Mahaman « *Effet des doses d'irradiation sur les semences de mil [Pennisetum glaucum (L.) R. Br.], variété HKP* ». **Ingénieur des Techniques Agricoles**; Faculté d'Agronomie, Université Abdou Moumouni, Niamey Niger; **02/2009** ;

(9) M. MAMOUDOU Saminou « *Etude des conditions optimales de la multiplication in vitro (micropropagation) de trois espèces du moringa : Moringa oleifera Lam, Moringa peregrina Forsk et Moringa stenopetala au Niger* ». **Ingénieur des Techniques Agricoles**; Faculté d'Agronomie, Université Abdou Moumouni, Niamey Niger; 23/09/2013

(10) M. IDE SOFFO Mahamadal Hadi « *Influence de la température et de certaines caractéristiques variétales (Taille et couleur des grains) sur la callogenèse du mil (Pennisetum glaucum [L.] R. Br.) en culture in-vitro* ». **Master II Phytotechnie**; Faculté d'Agronomie, Université Abdou Moumouni, Niamey Niger; **01/08/2013** ;

(11) M. ALI MOUSSA Yaou « *Conditions optimales de la multiplication in vitro de Salvadora persica L. et Simmondsia chinensis Link* ». **Master II Phytotechnie**; Faculté d'Agronomie, Université Abdou Moumouni, Niamey Niger; **05/08/2013** ;

(12) M^{elle} FANTA MADY CISSE Safiétou « *Production de microtubercules de pomme de terre (Solanum tuberosum L.) au Niger* »; **Master II Phytotechnie**; Faculté d'Agronomie, Université Abdou Moumouni, Niamey Niger; **19/12/2013** ;

(13) M. Saley Harouna OMAR « *Production des microtubercules de pomme de terre (Solanum tuberosum L.) via des vitroplants* ». **Master II Phytotechnie**; Faculté d'Agronomie, Université Abdou Moumouni, Niamey Niger; **31/07/2014**

(14) M. MAHAMADOU ADAMOU Nassirou « *Rhyzogenèse in vitro via organogenèse somatique directe de Maerua crassifolia Forssk* ». **Master II Phytotechnie**; Faculté d'Agronomie, Université Abdou Moumouni, Niamey Niger; **31/07/2014** ;

(15) M. NON-NDE DJIDAINARI Israël « *Culture in vitro de mil [Pennisetum glaucum (L) R. Br.]: Effets génotypiques de la Benzyladenine sur la micropropagation de mil cas de trois*

écotypes nigériens: HKP ANKOUTESS et ZONGO ». **Licence Générale ès-sciences Agronomiques**; Faculté d'Agronomie, Université Abdou Moumouni, Niamey Niger; **19/11/2014** ;

(16) M. Akouta Vivien Rodrigue TOGBEDDJI « *Réponses génotypiques in vitro de mil (*Pennisetum glaucum* (L.) R. Br) au polyéthylène glycol (PEG6000) cas de trois écotypes du Niger* ». **Licence Générale ès-sciences Agronomiques**; Faculté d'Agronomie, Université Abdou Moumouni, Niamey Niger; **19/11/2014** ;

(17) M. SOUMAILA SOUNAKOYE Illiassa « *Evaluation des performances agronomiques de dix (10) variétés de mil (*Pennisetum glaucum* (L.) R. Br) dans la région de Tillabéry (village de Lossa)* ». **Master II Phytotechnie**; Faculté d'Agronomie, Université Abdou Moumouni, Niamey Niger; **2016** ;

(18) M. MOUTARI YACOUBA Achirou « *Evaluation des performances agronomiques de dix (10) variétés de mil (*Pennisetum glaucum* (L.) R. Br) dans la région de Magaria* ». **Master II Phytotechnie**; Faculté d'Agronomie, Université Abdou Moumouni, Niamey Niger; **2016** ;

(19) M. ILLIASSOU Abdou Souley « *Evaluation des performances agronomiques de quelques variétés de mil (*Pennisetum glaucum* (L.) R. Br) pour la résistance à la sécheresse* ». **Master II Phytotechnie**; Faculté d'Agronomie et des sciences de l'environnement, Université Dan Dicko Dankoulodo, Maradi Niger; **2016** ;

(20) M. SANI DAOUDA Abdoul-Razak « *Variabilité génotypique de la tolérance thermique du mil (*Pennisetum glaucum* (L.) R. Br)* ». **Master II Sélection et Valorisation des Ressources Phytogénétiques**; UFR SVT, Université Ouaga I, Ouagadougou Burkina Faso; **2016** ;

(21) M. BOUBE OUSMANE Boubacar « *Effet génotypique sur la germination et la croissance in vitro chez *Vigna subterranea* VERDC.* » **Master II BIFOV**; Faculté des Sciences et Techniques, Université Abdou Moumouni, Niamey Niger; **2016** ;

(22) M^{me} IDI ADAMOUE Maria « *Réponse génotypique de *Vigna subterranea* VERDC à des*

concentrations variables de PolyEthylène Glycol 6000 ». **Master II BIFOV**; Faculté des Sciences et Techniques, Université Abdou Moumouni, Niamey Niger; **2016**.

4.7 Publications et travaux divers

4.7.1 Articles dans les revues Internationales à comité de lecture

1. **DO F., DAOUDA OUSMANE S., MARINI P. (1989).** "étude agrophysiologique des mécanismes de résistance du mil à la sécheresse: cas d'un stress hydrique terminal". Revue du Réseau pour l'Amélioration de la Productivité Agricole en Milieu Aride, 1989, Vol. 1. pp 57-74.
2. **DAOUDA OUSMANE S., SICOT M., THIÉRY JM. (1990).** Etude de l'hétérogénéité spatiale d'un champ expérimental de Niamey : corrélation entre les stocks d'eau et les caractéristiques pédologiques. Journées du G.F.H.N., Aix en Provence, Novembre 1990.
3. **BATCHO E.; DAOUDA OUSMANE S.; DO F.; ANNEROSE D.; KHALFAOUI JL.; FOFANA A.; LAFFRAY D.; LOUGUET P., (1990).** Etude de la croissance racinaire de six cultivars de mil. Rev. Rés. Amélior. Prod. Milieu Aride, (1990) 2 : 51-65
4. **SANTUCCI P., THIÉRY JM., DAOUDA OUSMANE S., DO F., MARINI P. (1992).** "Contribution à l'étude des profils racinaires du mil (*Pennisetum glaucum*) et méthode de calcul de la biomasse racinaire sous le poquet". Revue du Réseau pour l'Amélioration de la Productivité en Milieu Aride, 1992, Vol. 4. pp 25-34.
5. **Le Coz M., Favreau G. and Daouda Ousmane S. (2013).** Modeling Increased Groundwater Recharge due to Change from Rainfed to Irrigated Cropping in Semiarid Region; *Vadose Zone J.*, 2013:12, Issue 2; DOI:10.2136/vzj2012.0148;
6. **S. Daouda Ousmane, Wilfred Elegba and Kenneth Danso (2013).** Radiosensibility of pearl millet (*Pennisetum glaucum* (L.) R. Br) and cowpea (*Vigna unguiculata* (L.) Walp); *International J. of Innovation and Applied Studies*; Vol. 4, No Dec. 2013, pp 665-671
7. **Daouda Ousmane S. and Mouhamadou Mounkaila B. (2014)** Effect of Polyethylene glycol (PEG) 6000 on germination and seedling growth of pearl millet (*Pennisetum glaucum* (L.) R. Br) and LD₅₀ for *in vitro* screening for drought tolerance; *African J. of Biotechnology*; Vol. 13 (37) pp 3742-3747, 10 sept. 2014; DOI : 10.5897/AJB2013.13514

4.7.2 Articles dans les revues nationales à comité de lecture

1. **DAOUDA OUSMANE S., MARINI P., J-M. K. AMBOUTA, I. BOUZOU (2000).** " Amélioration du régime hydrique des sols dégradés des Jachères de l'ouest nigérien (Aspects méthodologiques, premiers résultats). Annales de l'Université Abdou Moumouni, Tome VI, pp. 195-205, 2000
2. **DAOUDA OUSMANE Sani, YAJI Guéro et BARAGE Moussa (2013).** Irrigation et fertilisation de l'oignon (*Allium cepa*) dans la basse vallée de la Tarka. *Annales de l'Université Abdou Moumouni*, Tome XIV-A, pp 13-25, 2013
3. **Daouda Ousmane S. (2014).** Evaluation de l'Application Directe du Phosphate Naturel de Tahoua, Seul ou mixé avec une Engrais Soluble, en utilisant la Technique du Marquage Isotopique au ^{32}P ; *Annales de l'Université Abdou Moumouni*, Tome XVI-A, pp 104-117, Septembre 2014
4. **Daouda Ousmane S. (2014).** Devenir de l'azote de l'engrais dans le système de culture mil-niébé sur un sol sableux au Niger: utilisation du traceur ^{15}N . *Annales de l'Université Abdou Moumouni*, Tome XVII-A, pp. 6-17, 2^e semestre 2014; pp 6-17

4.7.3 Publications dans les Workshops

1. **DAOUDA OUSMANE S., SICOT M., MARINI P. (1991).** "Caractérisation de la diversité hydrodynamiques d'un sol ferrugineux tropical, différencié sur sable dunaire en milieu soudano-sahélien". 1991, In: Soil water balance in the soudano-sahelian zone. Sivakumar, M.V.K.; Wallace, J.S.; Renard, C. et Giroux, C. (eds), IAHS publication n°199 (1991). pp 209-216.
2. **DAOUDA OUSMANE S., ROBERT E. MARINI P. (1993).** "Rôle du système racinaire dans la résistance à la sécheresse du mil: Analyse de la rhizogénèse post-florale." In: Mil en Afrique, Diversité génétique et agrophysiologique : potentialités et contraintes pour l'amélioration génétique et l'agriculture. Collection colloques et séminaires de l'ORSTOM, ORSTOM, 1993

4.7.4 Chapitre de livre et Thèse

1. **Daouda Ousmane S. (1996).** *Comportement hydrique de cultivars de mil (Pennisetum typhoides) en condition pédoclimatiques contraignantes : réactions de la plante entière à un stress hydrique post-floral.* Thèse de Doctorat. Ecole Nationale Supérieure Agronomique de Rennes, septembre 1996. 230 p.

4.7.5 Communications dans conférences et colloques

1. **"Amélioration de la résistance à la sécheresse des cultures"**. Du 20 au 24 Septembre 1989, Ouagadougou, Burkina Faso. Communication personnelle : Mécanismes agrophysiologiques de résistance à la sécheresse chez le mil : Racines et utilisation de l'eau du sol.
2. **"Soil Water Balance in the Sudano-Sahelian Zone"**. Du 18 au 23 Février 1991 à Niamey au Niger. Communication personnelle "Diversité hydrodynamique d'un sol ferrugineux tropical en milieu soudano-sahélien".
3. **"Diversité génétique et agrophysiologie : potentialités et contraintes pour l'amélioration génétique et l'agriculture"**. Du 24 au 26 Novembre 1992 à Montpellier en France. Communication personnelle : "Rôle du système racinaire dans la résistance à la sécheresse chez le mil".
4. « **Nouvelles stratégies d'amélioration de la sécurité alimentaire** dans les six pays les moins avancés du monde (RAF/5/036) » ; "alimentation hydrique et minérale dans le système de culture mil-niébé" (NER/5/010) : Conférence des Coordonnateurs, du 18 au 22 Décembre 1995 à Vienne en Autriche.
5. **"Increasing Production of Nutritious Food through Mutation Breeding and Biotechnology** »; Reunion de coordination des Contreparts nationaux du projet RAF5/050 impliquant 20 pays africains dont le Niger; Nairobi, Kenya, 24 – 28 Octobre 2005
6. **"Increasing Production of Nutritious Food through Mutation Breeding and Biotechnology** »; Reunion de coordination des Contreparts nationaux du projet RAF5/050 impliquant 20 pays africains dont le Niger; **Quatre Bornes**, Iles Maurice, 21 – 26 Mai 2007

4.8 Gestion des Projets de recherche

1988-1991 : Responsable exécutif du projet « **Irrigation de sécurité en milieu sahélien** » IRI-ORSTOM (actuel IRD). Il s'agissait de définir les conditions de la faisabilité technique et économique d'une irrigation de complément en cultures pluviales de mil et de niébé au Niger. Financement ORSTOM/MRST.

1989-1996 : Coresponsable du projet « **Amélioration de la productivité des cultures sèches** : identification de paramètres agrophysiologiques de résistances à la sécheresse chez le mil ». Il s'agissait de trouver des critères liés à la tolérance à la sécheresse, pouvant être pris en compte pour la sélection de variétés adaptées aux climats arides du Niger. Financements ORSTOM (MRST) ; FED

1995-1996 : Coordonnateur du projet NER/5/010 : « **Amélioration de la productivité des cultures pluviales au Niger** : optimisation de la gestion de l'eau et des engrais ». Il s'agissait de définir des paquets technologiques en matière de l'utilisation agricole de l'esu et des fertilisants destinés au projet « RAF/5/036 : Nouvelles stratégies pour améliorer la sécurité alimentaire dans les six pays les moins avancés ». Financement FAO/IAEA.

1995-1997 : Responsable du volet « **Dynamique de l'infiltration des eaux dans le sol et restauration de la fertilité des jachères** » : Projet 7 ACP RPR 269 (REG / 711) *Recherche sur les jachères en Afrique de l'Ouest*. Il s'agissait de renforcer le dossier sur les jachères de l'Ouest du Niger, mais surtout de définir de procédures simples pour accélérer la restauration de la fertilité des sols dégradés ou en voie de l'être et mis en jachère. Financement FED.

2001-2006: Contrepart national du projet RAF5/050 : **Increasing Production of Nutritious Food through Mutation Breeding and Biotechnology..**

2007-2011: Contrepart national du projet RAF5/056 : **“Field Evaluation and Dissemination of Improved Varieties Using Mutation Breeding and Biotechnology Techniques (AFRA II-5)”**

2009-2011: Contrepart national du projet NER5/014 : “ **To develop improved drought resistant lines and soil fertility management practices using nuclear, isotopic and mutation breeding techniques for cowpea-finger millet based cropping systems**”

2012-2013: Contrepart national du projet RAF5/015 : “ **Improving Productivity of the Millet-Cowpea Cropping System through Development and Dissemination of Improved Varieties and New Water and Fertiliser Management Techniques**”

2015-2016: Coordonnateur du projet Amélioration de la Productivité du Mil au Niger (APROMIL-Niger). Dans le Cadre du Programme pour la Productivité de l’Agriculture en Afrique de l’Ouest (PPAAO) sur Financement de la Banque Mondiale.

4.9 Activités Institutionnelles

Nommé **Attaché de Recherche** en Décembre 1987, auprès du Département Radio-Agronomie de l'Institut des Radio-Isotopes de l'Université de Niamey et titulaire d'un Diplôme d'Ingénieur Agronome et d'un Diplôme d'Agronomie Approfondie en Hydraulique et Climatologie Agricoles, j'ai été désigné **responsable exécutif** d'un des projets du Département : "**Irrigation de sécurité en milieu sahélien**". Le programme était conjointement exécuté entre l'IRI et l'ORSTOM (actuel IRD) et était financé à la fois par le ministère Français de la Recherche Scientifique et Technique (MRST) et le fonds compétitif européen pour la Science.

Ce projet nous a permis d'aider à définir les conditions de la faisabilité technique et économique d'une irrigation de complément en cultures pluviales de mil et de niébé au Niger. Avec la famine de 1988, le problème de l'insécurité alimentaire a refait surface au Niger et la nécessité d'augmenter la productivité des cultures en conditions sèches s'est fait sentir. Nous avons essayé, sur un dispositif expérimental de 5 hectares, de définir les conditions optimales de la mise en œuvre d'une petite irrigation simple et peu coûteuse pour les petits producteurs du mil et niébé nigériens. **La coordination des activités du terrain** (mise en place du protocole et observations) et celles du laboratoire (analyse des données, production et édition de rapport) m'ont été dévolues pour toute la durée du projet (1988-1991), sous la responsabilité du Chef du Département.

De 1990 à 1994, Chef du Département Adjoint de Radio-Agronomie, avec en charge la coordination des activités du Laboratoire de fertilité des sols et du bilan hydrique. A ce titre nous étions co-responsable du projet "**Amélioration de la productivité des cultures sèches**". Nous avons contribué à identifier les paramètres agrophysiologiques de résistances à la sécheresse chez le mil et nous avons renforcé les bases d'une amélioration génétique de l'espèce. Ce programme était financé par le fonds compétitifs du FED.

De 1994 à 1997 nous avons été désigné **Chef du Département Radio-Agronomie** et à ce titre, nous avons en charge la coordination de l'ensemble des activités du Département ainsi que les collaborations scientifiques avec d'autres institutions nationales et internationales de recherche etc.. Il s'agit notamment de :

1. Rédaction et mise en œuvre d'une convention de recherche multipartite, IRD-MRST (Français)-CERAAS-IRI, sur l'amélioration de l'adaptation à la sécheresse des cultures en conditions contraignantes. Cette convention a servi de

base pour le travail de Thèse de Monsieur Daouda Ousmane ;

2. La rédaction et la mise en œuvre d'une convention de recherche scientifiques avec l'Institut National des Recherches Agronomiques du Niger (INRAN) en collaboration avec l'Agence Internationale pour l'Energie Atomique (AIEA) sur "utilisation des isotopes dans la lutte contre la désertification"
3. La rédaction et la mise en œuvre d'une convention de collaboration scientifiques avec l'IRD, dans le cadre du programme "HAPEX Sahel" sur l'étude du "degré carré" de Niamey; Avec la prise en charge par l'IRI des données sol (humidité de surface, variation des stocks hydriques et flux de profondeur)
4. La rédaction et la mise en œuvre d'une convention de collaboration recherche avec l'ONG CADELTA (Cellule d'Appui au Développement Local de Téra) pour l'encadrement des producteurs de Niébé en culture de décrue, sur les principaux affluents du fleuve Niger;
5. La rédaction de plusieurs projets de coopération techniques avec l'AIEA (NER/5/010 ; RAF/5/036 ; NER/5/012 ; NER/5/014 ; NER/5/015, NER/5/017 ; RAF/5/056 ; RAF/5/066) dont Monsieur Daouda Ousmane fut homologué (contre-part national) ;
6. Le suivi de la formation des étudiants stagiaires de la faculté d'agronomie (Elèves-ingénieurs Agronomes) et de la faculté des sciences (Licence et DEA Sciences naturelles).
7. Sous la responsabilité du Directeur de l'IRI, la gestion administrative du personnel des laboratoires de mon Département, ainsi que la gestion de ces ressources financières.

Au titre du Chef de Département de Radio-Agronomie, j'ai été amené à assurer l'Intérim tournante du Directeur de l'IRI. Malgré ces charges administratives parallèles, d'importantes publications scientifiques et des participations aux rencontres scientifiques internationales sont issues de mes travaux.

4.10 Activités d'enseignement

4.10.1 Cours 1 : Agriculture Spéciale

Intitulé : Agriculture Spéciale

Public cible : Etudiants de niveau Licence, Faculté d'Agronomie, Université Abdou Moumouni de Niamey

Responsable du cours: Dr DAOUDA OUSMANE Sani

Objectifs pédagogiques :

1. Faire comprendre aux auditeurs les contraintes spécifiques aux principales cultures vivrières et de rentes nigériennes et leurs adaptations aux conditions sahéliennes. Donner aux auditeurs **le portrait global de chacune des principales cultures alimentaires et de rentes du Niger**, sous les aspects des exigences écologiques, culture et développement, ennemis de culture, amélioration de la productivité, récolte, conservation et importance économique et commerciale
2. Faire prendre conscience des besoins en recherche pour l'amélioration de la productivité en milieu contraignant.
3. Au terme du cours les apprenants devraient être aptes à développer des stratégies pour accroître la productivité du secteur agricole au Niger. Cela suppose les capacités suivantes :
 - ✚ La capacité d'expliquer les bases scientifiques de la croissance et de la productivité agricoles en relation avec les paramètres agroécologiques ;
 - ✚ La capacité de procéder au diagnostic cultural de chacune des principales cultures du Niger ;
 - ✚ La capacité de décrire les besoins écologiques et nutritionnels de chacune de ces principales cultures ;
 - ✚ La capacité de reconnaître les différents ennemis naturels de ces cultures et les solutions éventuelles à y apporter ;
 - ✚ La capacité d'aider les agriculteurs pour le choix des filières porteuses, en fonction du contexte agroécologique et économique.
 - ✚ La capacité de connaître et de vulgariser certains intrants agricoles de routine notamment les semences sélectionnées, les engrais, les pesticides etc.

Crédits affectés : 2

Contenu :

N°	Chapitres de l'ECUE	Volume horaire
1	Rappel sur les grands principes de l'agronomie et les différents types d'agriculture	4
2	Rappel sur les besoins en nutriments, le Capital sol et la fertilisation	4
3	La culture du mil	12
4	La culture du sorgho	4
5	La culture du Niébé et de l'Arachide	10
6	La culture du Riz	8
7	La culture du Sésame	2
8	La culture du Souchet	2
9	La culture de l'oignon	2
10	La culture du Manioc, de la Pomme de Terre et de la patate douce	2
	Totaux	50

Mode et critères d'évaluation :

Mode	Formes			
Contrôles continus	Examens écrits	TD	Travaux Pratiques	Travaux Personnels
	QCM	Étude de cas	Terrain	Recherche Bibliographie
	Examen de synthèse	Exposés	Laboratoire	

4.10.2 Cours 2 : Mécanismes de réponses des plantes aux stress abiotiques

Intitulé : Mécanismes de réponses des plantes aux stress abiotiques

Public cible : Etudiants de niveau Master 1 (Directs et professionnels), Faculté d'Agronomie, Université Abdou Moumouni de Niamey

Responsable du cours: Dr DAOUDA OUSMANE Sani

Objectifs pédagogiques :

- Faire comprendre aux auditeurs les enjeux agronomiques (baisse de rendement) liés à la mise en jeux des mécanismes de tolérance aux stress abiotiques et les perspectives de recherche face aux changements climatiques encourus
- Savoir faire le diagnostic des stress abiotiques en milieu réel
- Prévoir l'incidence sur les rendements des cultures

Crédits affectés : 1

Contenu

N°	Chapitres de l'ECUE	Volume Horaire
1	Rappel sur la physiologie végétale avec accent particulier sur les besoins nutritionnels de la plante	2
2	Rappel sur le <i>continuum</i> « Sol-Plante-Atmosphère » Flux de l'eau et des éléments minéraux	2
3	Les Différents stress abiotiques	2
4	Mécanismes de réponse au stress hydriques	4
5	Mécanismes de réponse au stress thermique (couplé au stress hydrique)	4
6	Mécanismes de réponse au stress Salin (couplé aux stress hydrique et thermique)	4
7	Autres stress (Lumière, Métaux lourds etc.)	2
	Totaux	20

Mode et critères d'évaluation :

Mode	Formes			
	Examens écrits	TD	Travaux Pratiques	Travaux Personnels
Contrôles continus	QCM	Étude de cas	Terrain	Recherche Bibliographie
	Examen de synthèse	Exposés	Laboratoire	

4.10.3 TP : Biotechnologie végétales

Intitulé : Initiation à la culture *in vitro*

Public cible : Etudiants de niveau Master 1 (Directs et professionnels), Faculté d'Agronomie, Université Abdou Moumouni de Niamey

Responsable du cours: Pr. BARAGE Moussa

Responsable TP : Dr DAOUDA OUSMANE Sani

Objectifs pédagogiques :

- Faire prendre conscience aux apprenants de l'importance de la condition axénique pour la culture *in vitro*
- Familiariser les apprenants à la manipulation et au repiquage des explants en conditions axéniques
- Savoir faire le diagnostic de la contamination

Contenu

N°	Intitulé	Volume Horaire
1	Conditions générales de travail dans un laboratoire de culture <i>in vitro</i> (conférence préparatoire du TP)	4
2	Préparation, stérilisation et conservation des solutions mères et des milieux de culture	4
3	Préparation, stérilisation et transfert des explants en conditions axéniques	4
4	Mise en culture et diagnostic des contaminations	4
	Totaux	16

Mode et critères d'évaluation : TP

4.11 Conclusion

Il ressort de cette synthèse une participation riche et variée à des activités de recherche, de valorisation des produits de recherche et d'encadrement de jeunes chercheurs. Le centre d'intérêt principal reste l'Amélioration de la productivité agricole en conditions contraignantes. L'importante participation à des conférences internationales témoigne du niveau d'échange et de diffusion scientifiques des résultats obtenus par le candidat.

REFERENCES

Alexandratos N and Bruinsma J (2012). World Agriculture Towards 2030/2050. The 2012 revision. ESA working Paper 12-03, June 2012. *Agricultural Development Economics Division*. FAO 2012. www.fao.org/economic/esa

Alpha Gado B. (1993). *Une histoire des famines au Sahel* : Paris, L'Harmattan, 139 p

Arauzo M and Valladolid M (2013). Drainage and N-leaching in alluvial soils under agricultural land uses: Implications for the implementation of the EU Nitrates Directive. *Agriculture, Ecosystems and Environment* 179 (2013) 94–107.

Batcho E, Daouda OS, Do F, Annarose DJM, Khalfaoui JL, Fofana A, Laffray D et Louguet P (1990). Etude de la croissance racinaire de six cultivars de mil (*Pennisetum americanum* L.). *Revue du Réseau pour l'Amélioration de la Productivité Agricole en Milieu Aride*. 2: 51-65

Bationo A, Lompo F and Koala S (1998). Research on nutrient flows and balances in West Africa: state-of-the-art. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, Volume 71, Issues 1–3, 1 December 1998, Pages 19–35

Blum A (2009). Effective use of water (EUW) and not water-use efficiency (WUE) is the target of crop yield improvement under drought stress. *Field Crops Research* 112 (2009) 119-123

Boureima Amadou, « La famine au Niger : les facteurs géographiques d'une crise », *Les Cahiers d'Outre-Mer*, 231-232 | 2005, 262-266.

Borlaug NE (2007). Feeding a hungry world. *Science* 318:359.

Bray EA, Bailey-Serres J, and Weretilnyk E (2000). Responses to abiotic stresses. In *Biochemistry and Molecular Biology of Plants*, Buchanan BB, Gruissem W, and Jones RL Rockville, MD (eds) : *American Society of Plant Biologists*, pp. 1158–1203

Luigi Cattivelli, Fulvia Rizza, Franz-W. Badeck, Elisabetta Mazzucotelli, Anna M. Mastrangelo, Enrico Francia, Caterina Mare, Alessandro Tondelli, A. Michele Stanca (2008). Drought tolerance improvement in crop plants: An integrated view from breeding to genomics. *Field Crops Research*, 105 (2008) 1–14

Ceccarelli S and Grando S (1996). Drought as a challenge for the plant breeder. *Plant Growth Reg.*, 20: 149-155

Clarke JM and Townley-Smith TF (1984). Screening and selection techniques for improving drought resistance. In : *Crop Breeding, a Contemporary Basis*. Vose PB and Blixt SG (eds). Pergamon Press, Oxford, UK. : 137-162

Clayton W D (1972). *Gramineae*. In Hepper FN (Ed.), *Flora of West Tropical Africa* (pp. 170–465). London: Crown Agents.

Dangles O, Carpio C, Saïdou A-A, Mariac C, Luong V, Pham J-L, Bezançon G and

Vigouroux Y (2009). Association Studies Identify Natural Variation at PHYC Linked to Flowering Time and Morphological Variation in Pearl Millet. *Genetics*, 182, p. 899-910, 2009
DOI: 10.1534/genetics.109.102756

Dias Da Silva JC, Nunes De Pinho JL, Laffray D et Louguet P (1990). Effet d'une contrainte hydrique contrôlée sur divers paramètres hydriques et physiologiques de cultivars de mil et sorgho sensibles et résistants à la sécheresse. *Rev. Rés. Amélior. Product. Agri. Milieu Aride*, 2 : 79-92.

Do F et Winkel T (1993). Mécanismes morpho-physiologiques de la résistance du mil à la sécheresse. I. intérêt d'une approche agrophysiologique. II. Résultats expérimentaux. In : *Mil d'Afrique ; diversité génétique et agro-physiologique: potentialités et contraintes pour l'amélioration génétique et l'agriculture*. Collection colloques et séminaires (ORSTOM). S. Hamon (éd), ORSTOM 1993. p 187-204.

FAO (2007). <http://www.fao.org/newsroom/en/news/2007/1000654/index.html>

FAO (2009). Global Agriculture Towards 2050. *High-Level Expert Forum*, Rome 12-13 October 2009.

Farooq M Wahid A Kobayashi N Fujita D and Basra SMA (2009). Plant drought stress: effects, mechanisms and management. *Agronomy for Sustainable Development*, Springer Verlag/EDP Sciences/INRA, 2009, 29 (1), pp.185-212

Floret C et Pontanier R (1993). Recherche sur les jachères en Afrique tropicale. Dans : Floret C, Pontanier R et Serpentini G (Eds) *La Jachère en Afrique tropicale*. 11-46. Dossier MAB n°16, UNESCO 1993.

Galina Stulina and Georgiy Solodkiy (2016). The Effect of Climate Change on Land and Water Use. *Agricultural Sciences*, 2015, 6, 834-847

Giri J (1994). *Histoire économique du sahel: des empires à la colonisation*. Karthala editions, 1994 - 259 pages

Giulio Francia, Shane K Green, Guido Bocci, Shan Man, Urban Emmenegger, John ML Ebos, Adina Weinerman, Yuval Shaked and Robert S Kerbel (2005). Down-regulation of DNA mismatch repair proteins in human and murine tumor spheroids: implications for multicellular resistance to alkylating agents. *molecular cancer therapeutics*, volume 4, issue 10 (October, 2005). Doi: 10.1158/1535-7163.mct-04-0214

Gregory PJ, Shepherd KD and Cooper PJM (1984). Effects of fertilizer on root growth and water use of barley in Northern Syria. *J. Agri. Sc.* 103: 429-438.

Gregory PJ (1989). The role of root characteristics in moderating the effects of drought. In: *Drought Resistance in Cereals*. Baker F.W.J. (ed), Wallingford : 141- 150

Hamdy A, Ragab R and Scarascia-Mugnozza E (2003), Coping with water scarcity: water saving and increasing water productivity. *Irrig. and Drain.*, 52: 3–20. doi:10.1002/ird.73

Hayashi K, Matsumoto N, Hayashi E T, Abdoulaye T, Shinjo H, Tabo R, Matzunaga R and Tobita S: Estimation of nitrogen flow within a village-farm model in Fakara region in Niger, Sahelian zone of West Africa; *Nutr. Cycl. Agroecosyst.* (2012) 92:289–304.

Henson IE, Mahalakshmi V, Alagars Wamy G and Bidinger FR (1983). Stomatal response to water stress and its relationship to bulk leaf water status and osmotic adjustment in pearl millet. *J. Exp. Bot.*, 34, 442-450.

HURD EA (1974). Phenotype and drought tolerance in wheat. *Agric. Meteor.*, 14 : 39-55.

Ifeanyieze FO, Alkali M, Okoye R N and Ikehi M E (2016). Altered climate and livelihood of farming families in Niger Delta region of Nigeria. *African Journal of Agricultural Research*, Vol. 11(10), pp. 882-888, 10 March, 2016. DOI: 10.5897/AJAR2015.10716

INS-Niger (2014). *Annuaire statistique du Niger 2010- 2014 : 7. Population.*

Jones JW and Zur B (1984). Simulation of possible adaptive mechanisms in crops subjected to water stress. *Irrigation Science* 5: 251-264.

Jordan WR, Douglas WA and Shouse PJ (1983). Strategies and crop improvement for drought-prone regions. In: *Plant Production and Management Under Drought Conditions*. Stone JF and Willis W (eds). Elseviers, Amsterdam, Netherlands, 251-264

Jordan WR, Miller FR and Morris DE (1979). Genetic variation in root and shoot growth of sorghum in hydroponics. *Crop Science*, 19: 468-472

Jana M Kholová (2010). Understanding of terminal drought tolerance mechanisms in pearl millet (*Pennisetum glaucum* (L.) R. Br.). *PhD Thesis*, Charles University, Faculty of Science; Prague

Christoph Tim Krannich, Lisa Maletzki, Christina Kurowsky and Renate Horn (2015). Network Candidate Genes in Breeding for Drought Tolerant Crops. *Int. J. Mol. Sci.* 2015, 16, 16378-16400; doi:10.3390/ijms160716378

Levitt J (Jacob) (1980). *Responses of plants to environmental stresses* (2nd ed). Academic Press, New York ; London [etc.], 497p

Ludlow MM and Muchow RC (1988). Critical evaluation of the possibilities for modifying crops for high production per unit of precipitation. In: *Drought Research Priorities for the Dryland Tropics*. Bidinger FR and Johansen C (eds) ICRISAT, Patancheru, India, pp 179-211

Laffray D et Louguet P (1989). Appareil stomatique et résistance à la sécheresse. *Rév. Rés. Amélior. Prod. Agr. milieu Arid.*, 1, 32-46.

Mariac C, Jehin L, Saïdou AA, Thuillet AC, Couderc M, Sire P, Jugdé H, Adam H, Bezançon G, Pham JL, Vigouroux Y (2010). Genetic basis of pearl millet adaptation along an environmental gradient investigated by a combination of genome scan and association mapping. *Molecular ecology*. doi: 10.1111/j.1365-294X.2010.04893.x

Matthews RB, Harris D, Nageswara Rao RC, Williams JS and Wadia KDR (1988). The physiological basis for yield differences between four genotypes of groundnut (*Arachis hypogea*) in response to drought. I. Dry matter production and water use. *Exp. Agri.*, 24 : 191-202.

Monteith JL (1986). How do crops manipulate water supply and demand? *Phil. Trans. R. Soc. Bud.* A 316, 245-259 (1986)

Moussa S (2013). Situation des sols du Niger, contraintes et besoins. *Global Soil Partnership (GSP) in West Africa*. 4-5 Février 2013, Accra, Ghana.

Muchow RC and Sinclair TR (1986). Water and nitrogen limitations in soybean grain production. II. Field and mosels analyses. *Field Crops Res.* 15: 143-156

Niel H, Leduc C, Dieulin C (2005) : Caractérisation de la Variabilité Spatiale et Temporelle des Précipitations Annuelles sur le Bassin du Lac Tchad au Cours du 20^{ème} Siècle. *Hydrological Sciences Journal*, Volume: 50 (2) April 2005, Pp: 223-243

Obilana AB and Manyasa E (2002). Millets. In '*Pseudocereals and less common cereals: grain properties and utilization potential*' (P.S. Belton and J.R.N. Taylor eds), Springer-Verlag, Berlin Heidelberg New York (2002) pp 177-217.

Okalebo JR, Othieno CO, Woomer PL, Karanja NK, Semoka JRM, Bekunda MA, Mugendi DN, Muasya RM, Bationo A and Mukhwana EJ (2006). Available technologies to replenish soil fertility in East Africa. *Nutrient Cycling in Agroecosystems* 76:153–170 (2006)

Passioura JB (1996). Drought and drought tolerance. *Plant Growth Regul.* 20, 79–83

Passioura JB (2006). Increasing crop productivity when water is scarce; from breeding to field management. *Agric. Water Manage.* 80, 176–196.

Pieri C (1989). Fertilité des terres de savanes. Bilan de trente ans de recherche et de développement agricoles au Sud du Sahara. *Publications CIRAD-IRAT* Montpellier, 444 p.

Reynolds M, Tuberosa R (2008). Translational research impacting on crop productivity in drought-prone environments. *Curr Opin Plant Biol* 11:171–179

Ryan John and Rolf Sommer (2010). Fertilizer best management practices in the dryland Mediterranean area: concepts and perspectives. *19th World Congress of Soil Science*, Soil Solutions for a Changing World, 1-6 August 2010, Brisbane, Australia. pp 97-99

Saïdou Abdoul-Aziz, Cédric Mariac, Vivianne Luong, Jean-Louis Pham, Gilles Bezançon, Yves Vigouroux (2009). Association Studies Identify Natural Variation at *PHYC* Linked to Flowering Time and Morphological Variation in Pearl Millet. *Genetics* July 1, 2009 vol. 182 no. 3, 899-910; DOI: 10.1534/genetics.109.102756

Scheff J and Frierson D (2012). Twenty-First-Century Multimodel Subtropical Precipitation Declines Are Mostly Midlatitude Shifts. *Journal of climate*, Vol. 25 (2012): 4330-4347. DOI: 10.1175/JCLI-D-11-00393.1

Shriniwas AS and Subbiah BV (1976). Roots studies of some Bajra hybrids (*Pennisetum thyphoides* Stapf). *J. Nuc. Agri. Bio.* 5: 15-16

SIVAKUMAR, S.V.K. 1986. Programme Ouest Africain de l'ICRISAT. Rapport Annuel, Centre Sahélien de l'ICRISAT, 1986, Niamey, Niger. pp 47-53

Solomon S, Qin D, Manning M, Alley RB, Berntsen T, Bindoff NL, Chen Z, Chidthaisong A, Gregory JM, Hegerl GC, Heimann M, Hewitson B, Hoskins BJ, Joos F, Jouzel J, Kattsov V, Lohmann U, Matsuno T, Molina M, Nicholls N, Overpeck J, Raga G, Ramaswamy V, Ren J, Rusticucci M, Somerville R, Stocker TF, Whetton P, Wood RA and Wratt D (2007): Technical Summary. In: *Climate Change 2007: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* [Solomon, S., D. Qin, M. Manning, Z. Chen, M. Marquis, K.B. Averyt, M. Tignor and H.L. Miller (eds.)]. *Cambridge University Press*, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA

Stapf O and Hubbard CE (1934). *Pennisetum*. In D. Prain (Ed.) *The flora of tropical Africa* Vol. 9. London: Crown Agents.

Taylor HM, Burnett E and Booth GD (1978). Top root elongation rate of soybeans. *Zeitschrift fur Acker und Pflanzenbau* 1 46 : 33-39

Turner NC and Nicholas ME (1987). Drought resistance of wheat for light textural soils in a Mediterranean climate. *In Drought Tolerance in Winter Cereals*. Srivastava, J.P., Porceddu, E., Acevedo, E. and Varma, S. (eds), Jones Wiley, New York: 203-216

Vanlauwe B, Bationo A, Chianu J, Giller KE, Merckx R, Mkwunye U, Ohiokpehai O, Pypers P, Tabo R, Shepherd KD, Smaling EMA, Woomer PL, Sanginga N (2010). Integrated Soil Fertility Management: Operational Definition and Consequences for Implementation and Dissemination. *Outlook on Agriculture*, Vol 39, No 1, 2010, pp 17-24

Vanlauwe B, Descheemaeker K, Giller KE, Huising J, Merckx R, Nziguheba G, Wendt J and Zingore S (2015). Integrated soil fertility management in sub-Saharan Africa: unravelling local adaptation. *SOIL*, 1, 491–508, 2015. doi:10.5194/soil-1-491-2015

Winkel T and Do F (1992). Caractères morphologiques et physiologiques de résistance du mil (*Pennisetum glaucum* (L.) R. Br.) à la sécheresse. *Agronomie tropicale*, vol. 46, n°4, pp. 339-351

ANNEXES

ANNEXE 1 : SCHEMA EXPLICATIF FONCTIONNEMENT HYDRIQUE IC30

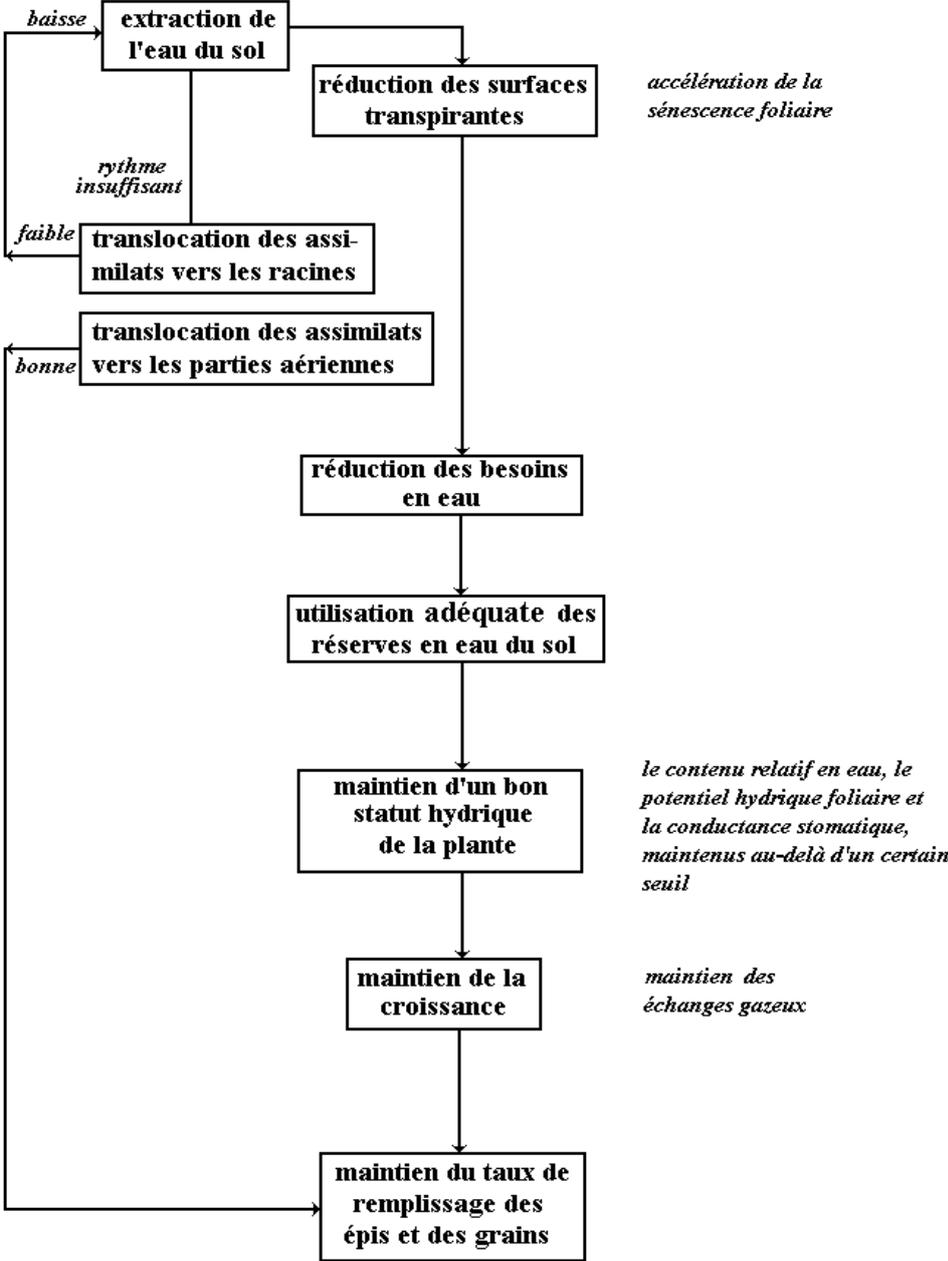


Schéma explicatif du fonctionnement hydrique du mil IC30 soumis à une contrainte hydrique de fin de cycle et de longue durée (Floraison-Récolte).

ANNEXE 2 : SCHEMA EXPLICATIF FONCTIONNEMENT HYDRIQUE HKP

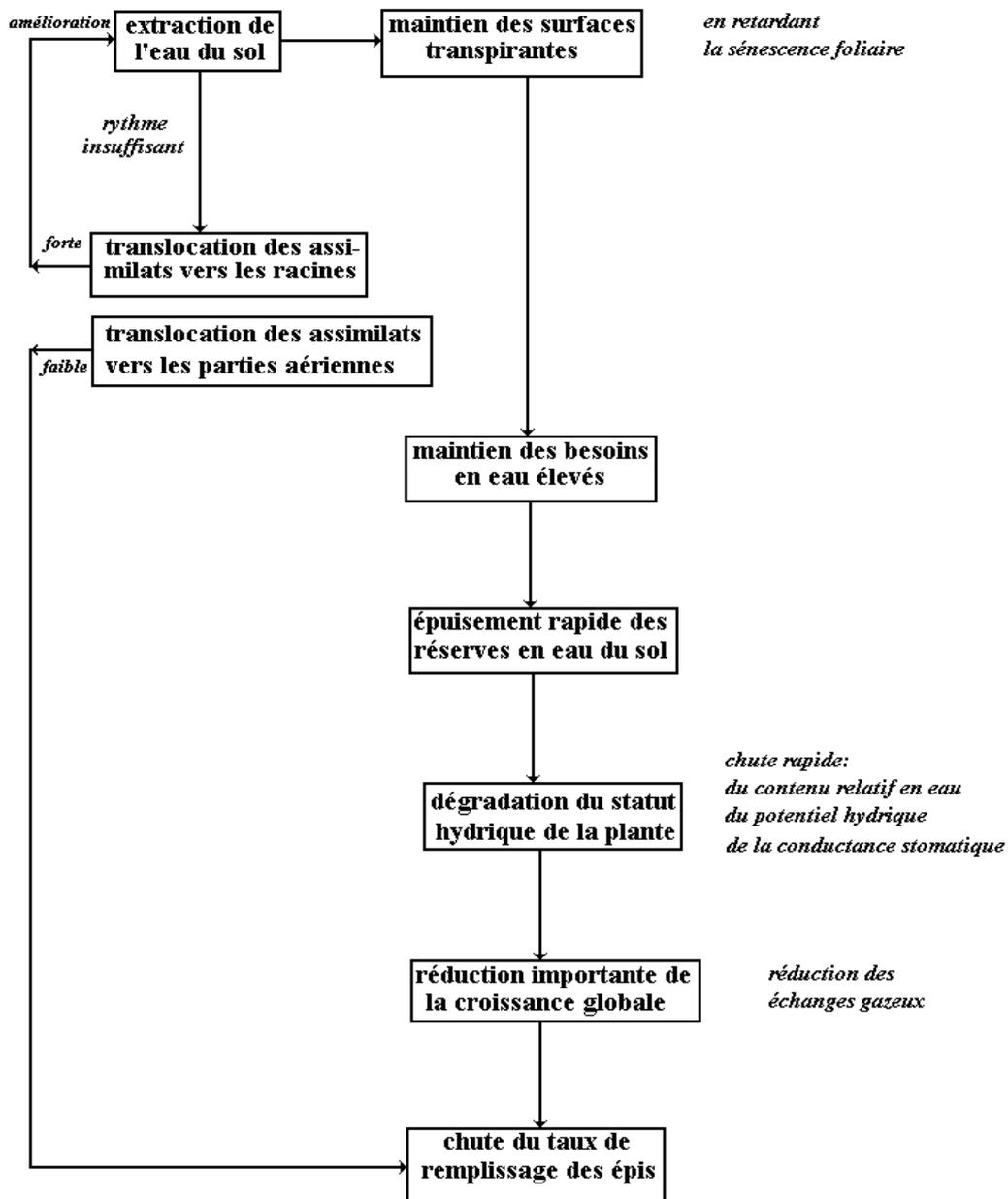


Schéma explicatif du fonctionnement hydrique du mil HKP soumis à une contrainte hydrique de fin de cycle et de longue durée (Floraison-Récolte).