



Les cuvettes du Manga, un écosystème unique en milieu semi-aride objet d'une recherche interdisciplinaire et pluri-institutionnelle

The circular lowlands of Manga, a unique ecosystem in semi-arid environment subject to an interdisciplinary and multi-institutional research

Karimou Jean-Marie AMBOUTA ¹, Mahamadou KARIMOU BARKE ², Adamou Didier TIDJANI ¹, Bernard TYCHON ²

Abstract: For a little more than three decades, south-eastern Niger and more particularly the Departments of Gouré, Goudoumaria and Mainé-Soroa are facing a process of desertification due to climatic variations and human activities. In this area, one of the most visible forms of the phenomenon is the remobilization of sand dunes formerly fixed by vegetation. In their displacements, these sands threaten to bury the villages, the socio-economic infrastructures, the agro-pastoral spaces, but also and especially the circular lowlands which constitute real sources of agricultural productions and incomes for the populations. The oasis system of the Manga is a unique ecosystem that includes agricultural production potential and environmental resources like no other in this semi-arid environment. To help meet the challenge of the degradation of this oasian systems of south-eastern Niger, the "Commission Universitaire pour le Développement" of the French speaking Community of Belgium (CUD) has funded a first phase of a targeted inter-university program (PIC) entitled "Encroachment of circular lowlands of the South-East of Niger by aeolian supply: process, impacts and means of struggle" which opted for an interdisciplinary approach to find solutions to the problem of silting of oasian basins in south-eastern Niger. Following the evaluation of the first phase of the program, the need for a continuation phase was evident. This second phase funded by the Academy of Research and Higher Education (ARES) is entitled "Preservation of circular lowlands and their socio-economic role in southeastern Niger (PIC REC-GOURE-2)" and it aims at proposing sustainable management of these environments, notably by conserving and increasing the agricultural potential of the oasis basins, areas of lowlands with high agricultural value. This study illustrates the main results obtained through the interdisciplinary approach in the PIC in the Department of Gouré.

Key-words: desertification, silting, circular lowlands, interdisciplinarity, Gouré, south-eastern Niger

Résumé : Depuis un peu plus de trois décennies, le sud-est du Niger et plus particulièrement les Départements de Gouré, Goudoumaria et de Mainé-Soroa sont confrontés à un processus de désertification dû aux variations climatiques et aux activités anthropiques. Dans cette zone, l'une des formes les plus visibles du phénomène est la remobilisation des sables des dunes autrefois fixés par la végétation. Dans leur progression, ces sables menacent d'ensevelir les villages, les infrastructures socio-économiques, les espaces agro-pastoraux, mais aussi et surtout les cuvettes oasiennes qui constituent de véritables sources de productions agricoles et de revenus pour les populations. Le système oasien du Manga constitue un écosystème particulier qui renferme un potentiel de production agricole et des ressources environnementales à nul autre pareil dans ce milieu semi-aride. Pour aider à faire face au défi de la dégradation des systèmes oasiens du sud-est du Niger, la Commission Universitaire pour le Développement (CUD) a financé une première phase d'un programme interuniversitaire ciblé (PIC) intitulé « Envahissement des cuvettes du sud-est nigérien par apports éoliens : processus, impacts et moyens de lutte » qui a opté pour une démarche interdisciplinaire pour rechercher des solutions à ce problème d'ensablement des cuvettes dans le sud-est nigérien. Suite à l'évaluation de la première phase du programme, la nécessité d'un PIC de poursuite s'est imposée. Cette deuxième phase sur financement de l'Académie de Recherche et d'Enseignement Supérieur (ARES) est intitulée « Préservation des cuvettes oasiennes et de leur rôle socio-économique dans le sud-est du Niger (PIC REC-GOURE-2) » et a pour but de proposer une gestion durable de ces milieux, notamment par la conservation et l'augmentation du potentiel agricole des cuvettes oasiennes, zones de bas-fonds à haute valeur agricole. Cette étude illustre à travers la démarche interdisciplinaire utilisée les principaux résultats du PIC dans le Département de Gouré.

Mots-clés : désertification, ensablement, cuvettes oasiennes, interdisciplinarité, Gouré, sud-est du Niger

¹ Faculté d'Agronomie, Université Abdou Moumouni, BP. 10960, Niamey, Niger.

*Auteur correspondant : ambouta.karimou@yahoo.fr

² Faculté des Sciences, Département des Sciences et Gestion de l'Environnement, UR SPHERES, Université de Liège, Avenue de Longwy, 185, B-6700 Arlon, Belgique.

INTRODUCTION

Pendant longtemps, il a été reconnu que, dans le sud-est du Niger, la limite naturelle entre les dunes mobiles du Nord et les dunes fixées par la végétation du Sud correspondait approximativement à l'isohyète 150 mm (MAINGUET *et al.*, 1979 ; KARIMOUNE, 1994 ; OZER *et al.*, 2005). Aujourd'hui, suite à la grande sécheresse survenue dans tout le Sahel au cours des années 1970 et 1980 conjuguée à la pression humaine sur les ressources naturelles, les dunes vives sont visibles au sud de la zone jusqu'à la frontière avec le Nigeria sous une pluviométrie moyenne annuelle supérieure à 350 mm. Ce processus de désertification, amplifié par les activités humaines (déboisement, surpâturage, augmentation des surfaces cultivées), a conduit à la remise en mouvement des dunes (OZER, 2002). Cette dégradation du milieu s'est également accompagnée d'une augmentation de la vitesse du vent (TIDJANI, 2008). Il en a résulté une augmentation des processus éoliens avec, comme conséquence, un ensablement des cuvettes.

Les cuvettes oasiennes sont des zones de bas-fonds de forme circulaire ou ovale situées en milieu sahélien pastoral. Elles maintiennent en place des populations rurales car elles sont la source principale de production et de diversification agricole dans ces régions à potentialités agricoles très réduites (TYCHON & AMBOUTA, 2009). Sans ces cuvettes, les populations seraient obligées d'émigrer, ce qui constitue actuellement un problème majeur en Afrique de l'Ouest (GEMENNE *et al.*, 2017).

Cependant, ces cuvettes se dégradent lentement. Même la tendance récente enregistrée vers une pluviométrie plus abondante au Niger et dans la zone d'intérêt depuis les années 1990 (KARIMOU BARKE *et al.*, 2015a ; KARIMOUNE *et al.*, 2017 ; OZER *et al.*, 2003, 2009, 2017) n'a pas permis d'inverser le processus de la désertification dans le sud-est nigérien (HOUNTONDI *et al.*, 2005), donc de l'ensablement des cuvettes, mettant davantage en péril la sécurité alimentaire et aggravant la pauvreté des communautés riveraines.

Pour aider la population à optimiser l'exploitation de ces ressources et à contourner ces contraintes, l'Etat nigérien et ses partenaires techniques et financiers (ONG, Universités, Projet de développement,...) tentent de promouvoir les bonnes pratiques de valorisation et de préservation pour une meilleure résilience des communautés et de leur écosystème. Parmi ces partenaires se trouve le Programme interuniversitaire ciblé de Recherche sur l'ensablement des cuvettes de Gouré, phase 1 (2003-2007) (PIC-REC Gouré 1) financé par la Commission Universitaire pour le Développement (CUD) ; ce programme intitulé « Envahissement des cuvettes du sud-est nigérien par apports éoliens : processus, impacts et moyens de lutte » (TYCHON & AMBOUTA, 2009) avait pour objectif de mieux comprendre le processus de l'ensablement des cuvettes afin de proposer des solutions pour y remédier, mais plusieurs questions quant à l'avenir des cuvettes restaient en suspens (TYCHON *et al.*, 2009).

Suite à l'évaluation de la première phase, l'Académie de Recherche et d'Enseignement Supérieur (ARES) décidait de financer une deuxième phase du projet (2011-2016) dite PIC-REC Gouré 2 avec pour objectif de proposer une gestion durable de ces milieux, notamment par la conservation et l'augmentation du potentiel agricole des cuvettes oasiennes. Tous les travaux conduits dans le cadre du PIC-REC ont utilisé l'approche fondée sur une recherche pluridisciplinaire et pluri-institutionnelle sur la désertification en général et sur la dégradation des cuvettes oasiennes de Gouré en particulier. L'objectif de cet article est de présenter les principaux résultats de ce projet pour une gestion du problème de l'ensablement et une gestion durable des cuvettes du sud-est nigérien.

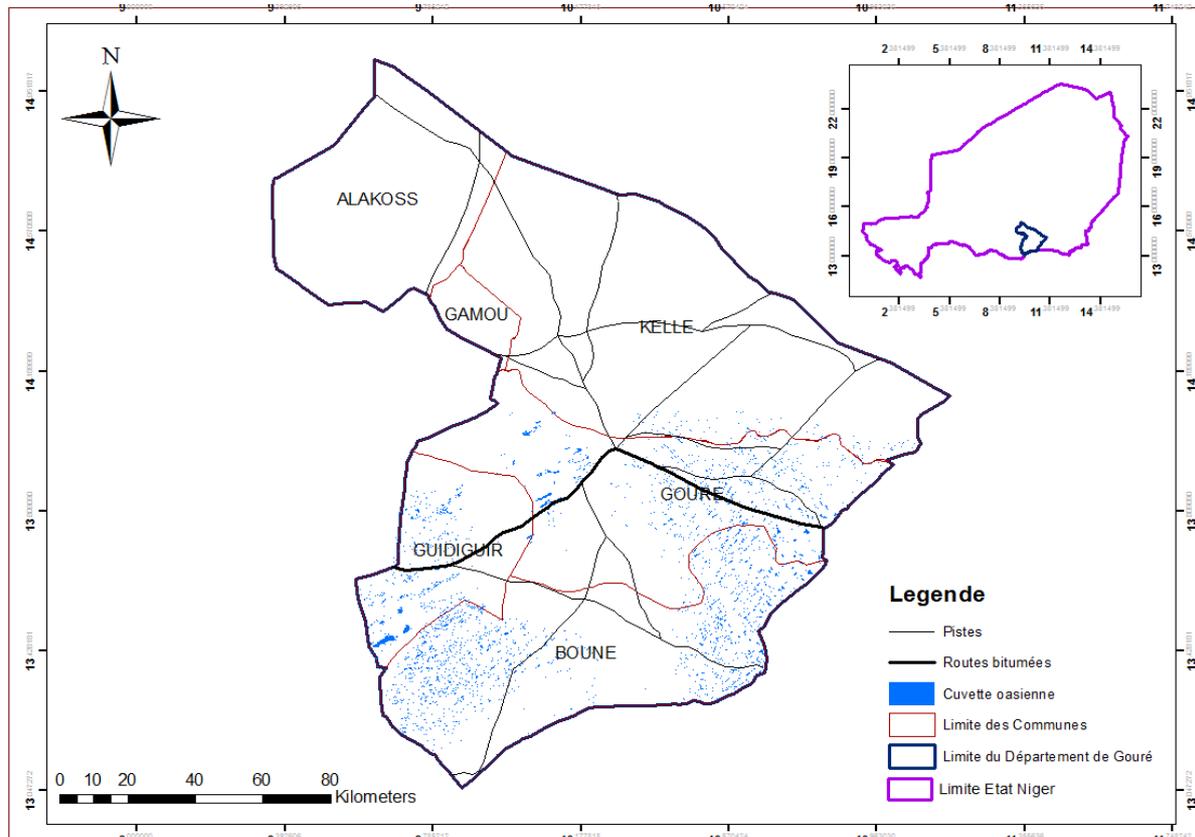
MATERIELS ET METHODES

Zone d'étude

La zone d'étude se situe dans le sud-est du Niger, dans le Département de Gouré. Les cuvettes oasiennes étudiées se localisent dans la partie méridionale du département et sont situées entre les latitudes 13°07' et 14°00' Nord et les longitudes 9°35' et 11°50' Est (Figure 1).

La zone d'étude est un vaste plateau sableux dont l'altitude varie de 300 à 400 mètres. Ses parties hautes correspondent à des bourrelets dunaires dont les sommets sont souvent de sable vif. Ce

plateau est constellé de petites dépressions assez profondes et plus ou moins circulaires : les cuvettes. Elles sont utilisées à des fins agrosylvopastorales grâce à la présence d'une nappe phréatique à faible profondeur et parfois affleurante.



Dans cette zone, les systèmes dunaires dominent largement sur les reliefs résiduels et représentent la morphologie caractéristique sous climat aride (200 à 400 mm de pluie en moyenne par an). C'est une région endoréique caractérisée par un réseau hydrographique saisonnier composé essentiellement de ravins et de mares. La végétation est principalement constituée d'une steppe arbustive claire dans le nord qui laisse la place à une steppe plus diffuse et arborée dans le sud (KARIMOU BARKE, 2005).

De nombreuses cuvettes de la zone subissent un ensablement plus ou moins important pouvant, à terme, conduire à leur abandon par les exploitants et à leur disparition par ensevelissement. Dans la zone d'étude, on dénombre 10 717 cuvettes de taille supérieure à 0,2 ha (KARIMOU BARKE *et al.*, 2015b).

Composition de l'équipe multi-institutionnelle et multidisciplinaire

L'équipe, qui a très peu changé d'une phase à l'autre, comprend de nombreuses compétences de partenaires belges et nigériens (TYCHON & AMBOUTA, 2009). L'équipe belge est composée de géographes, de sociologues et d'agronomes de l'Université de Liège et de l'Université Catholique de Louvain présentant une expertise dans les domaines du suivi de l'érosion éolienne et de son impact sur les milieux naturels, agricoles et humains. L'équipe nigérienne est composée d'agronomes, de pédologues, de géomorphologues, d'hydrogéologues, d'hydrologues, de biologistes, de géographes et de sociologues de quatre facultés de l'Université Abdou Moumouni de Niamey (Faculté d'Agronomie, Ecole Normale Supérieure, Faculté des Lettres et Sciences Humaines, Faculté des Sciences et Techniques) présentant une expertise dans les états de surface des sols, la végétation, les productions agricoles, les sols, la dynamique des nappes, la socio-économie et l'érosion en milieu sahélien.

METHODOLOGIE

Pour toutes les deux phases du programme, la méthodologie de travail repose sur le recrutement de doctorants nigériens inscrits dans les universités belges dont la thématique de recherche couvre une partie des objectifs de recherche définis pour la phase concernée. Leur encadrement scientifique est assuré par un binôme constitué de partenaires belge et nigérien. Chaque doctorant est appuyé par des DEA/DES/Masters et des stagiaires belges et nigériens pour leurs travaux de fin d'étude encadrés par un chercheur spécialiste de l'institution d'appartenance.

En première phase du programme, l'équipe envoyée sur le terrain avait à répondre aux questions relatives à la compréhension du processus d'ensablement et ses conséquences d'une part et aux techniques de lutte contre l'ensablement d'autre part. Ainsi, deux cuvettes relativement proches de la ville de Gouré ont été instrumentées et suivies de manière intensive. Pour la première question, il s'est agi d'acquérir les données climatiques de la zone à partir des stations synoptiques de Zinder, Gouré et Maïné Soroa sur une longue durée et de les mesurer au niveau local des cuvettes par installation de stations météorologiques automatiques (TIDJANI A.D. *et al.*, 2009). Afin de mieux cerner le problème d'ensablement des cuvettes à large échelle et d'analyser l'évolution du processus au cours du temps, l'approche multi-temporelle par télédétection s'est imposée (BODART & OZER, 2009 ; TIDJANI A.A. *et al.*, 2009). La comparaison de photographies aériennes de l'IGN France (1958), de l'IGN Niger (1975), d'images CORONA (1960-1970), SPOT, LANDSAT, ASTER, ERS, et ENVISAT s'est avérée nécessaire pour circonscrire les zones de déflation, les secteurs d'accumulation et la direction du déplacement dunaire. Le suivi environnemental par télédétection a été mis en parallèle avec les mesures de lithométéores pour tenter de mettre en rapport la dégradation des terres au cours de ces 50 dernières années et la production de lithométéores via érosion locale directe ; d'où une confrontation directe entre géomorphologie et climatologie. Les données relatives aux lithométéores, déterminées par les mesures de visibilité horizontale (OZER, 2005 ; DE LONGUEVILLE *et al.*, 2009, 2013) ont été utilisées dans la confrontation entre géomorphologie et climatologie. Pour le suivi local de l'ensablement des cuvettes, les flux horizontaux de sable transporté par le vent ont été mesurés au moyen de capteurs de sable de type MWAC (Wilson and Cooke Sediment Catcher) (TIDJANI, 2008). Le sable collecté par les capteurs a été récolté et pesé après séchage après chaque tempête de sable. Sur base des variations de flux dans l'espace, un bilan des apports et des dépôts de sédiments transportés par saltation a été calculé pour différents types d'utilisation des terres quelle que soit la direction du vent.

L'impact des flux de sable sur la fertilité chimique des sols a été évalué sur base d'un bilan de masse des éléments nutritifs transportés par le vent et par des mesures directes dans les zones de déflation et de dépôts de sédiment éoliens. Le bilan de masse pour les particules transportées par saltation a été calculé en se basant sur les flux de sédiments entrant et sortant en s'inspirant de la méthode développée par RAJOT (2001). Les flux de poussières descendants ont été mesurés à l'aide d'un capteur de poussière passif de type CAPYR (ORANGE *et al.*, 1990). Les flux de poussières ascendants ont été évalués à partir des flux horizontaux de saltation en se basant sur l'hypothèse que le flux ascendant représente une fraction constante du flux horizontal. Pour l'ensemble des deux cuvettes, des bilans de nutriments ont été calculés à partir des bilans de masse des sables et des poussières et de leur composition chimique.

Pour la deuxième question relative aux techniques de fixation des dunes pour lutter contre l'ensablement, il a été procédé en tout premier lieu à la sélection des espèces et variétés végétales adaptées à la fixation biologique des dunes. Il s'est agi (i) de déterminer les espèces et variétés les plus tolérantes au stress hydrique et (ii) de sélectionner, parmi ces dernières, les plus performantes en matière d'efficacité d'utilisation de l'eau disponible.

Afin d'améliorer l'aptitude des plantes retenues pour la fixation biologique des dunes, elles furent mycorhizées par inoculation artificielle des plants dès le semis, soit par les souches indigènes, soit par des champignons mycorhiziens sélectionnés.

Enfin, l'impact de l'ensablement des cuvettes et de la fixation des dunes a été évalué par les socio-économistes du projet. Cette évaluation s'est fondée sur des enquêtes dans les villages riverains des cuvettes dont les dunes ont été fixées, focalisées sur l'estimation des quantités de biens matériels

et de main d'œuvre requises pour leur réalisation ainsi que les augmentations de production occasionnées par elles.

La deuxième phase du programme a permis d'évaluer l'efficacité de différents types de fixation physique de dunes, d'estimer la dynamique des nappes dans neuf cuvettes sélectionnées selon un gradient pluviométrique nord-sud, d'élaborer des indicateurs standardisés de dégradation des cuvettes et de déterminer les facteurs culturels, sociaux et économiques qui entrent en ligne de compte dans la décision d'entretenir l'outil de production (cuvette) ou de l'abandonner.

Pour évaluer l'efficacité des types de fixation des dunes, un inventaire des différentes formes de dégradation des dunes et des matériaux disponibles localement et utilisables pour la fixation mécanique a été réalisé. 32 types de dunes à des niveaux de dégradation faible, moyen et élevé furent choisis. Pour chaque dune, les sols de trois positions topographiques sur la dune (plat, crête, front) ont été échantillonnés en vue d'une caractérisation physico-chimique en laboratoire et pour tester le potentiel de ces sols en semences d'herbacées viables. En vue de tester l'efficacité de différents matériaux pour fixer les dunes, une expérimentation a été réalisée sur une dune avec les traitements en blocs complets randomisés à trois répétitions selon (i) clayonnage à l'aide de branchages de *Leptadenia pyrotechnica* ; (ii) clayonnage à l'aide de rachis de doum ; et (iii) clayonnage à l'aide de branchages de *Leptadenia pyrotechnica* associés à un pavage de rachis de doum. Les données récoltées portent sur le flux éolien, l'accumulation de sable à l'amont et à l'aval de la palissade, la vitesse d'ensevelissement des palissades, la microtopographie à l'intérieur des claies et le degré de dégradation des palissades.

Concernant l'hydrodynamique dans les cuvettes, une caractérisation de l'hydrogéologie de la zone a été réalisée à travers des prospections géoélectriques pour évaluer la succession de couches géologiques et leurs propriétés hydrodynamiques. Un réseau de petits piézomètres a été également installé dans les neuf cuvettes représentatives selon un transect ENE-WSW afin de vérifier le gradient et le sens des écoulements, de suivre les fluctuations du niveau d'eau au cours de l'année (estimation des périodes de recharge / décharge) et de réaliser des essais de pompage.

Dans l'optique de l'élaboration d'outils de suivi et d'indices de dégradation spatiaux des cuvettes, la démarche retenue s'est basée sur l'utilisation d'images à très haute résolution spatiale qui ont été traitées en appliquant les techniques d'analyse spatiale par objet qui offrent d'intéressantes possibilités de segmentation et ensuite de classification des images. Sur la base de ces informations, le nombre de cuvettes a été déterminé et des indicateurs spatiaux de dégradation des cuvettes pour toute la zone d'étude ont été calculés. Ces indicateurs tiennent notamment compte des surfaces ensablées des cuvettes, des surfaces salinisées, de la mauvaise gestion de l'espace autour des cuvettes et de la présence à proximité des cuvettes, de zones visibles ou en devenir de sable vif. Une analyse diachronique a permis de suivre l'évolution de la dégradation des cuvettes exprimée par ces différents indicateurs et de repérer le taux de dégradation des cuvettes au cours du temps.

Pour ce qui est de la gestion durable des ressources des cuvettes, les investigations ont commencé par l'identification, à travers des visites, des personnes ressources au niveau des neuf cuvettes retenues. Puis la méthode des entretiens individuels et collectifs a été utilisée pour recueillir des informations sur les systèmes fonciers des cuvettes, les pratiques foncières dans les systèmes de production, les différents groupes stratégiques d'acteurs et les rapports de pouvoir (hommes, femmes, jeunes, aînés, cadets), les pratiques foncières, l'accès des femmes à la terre et aux ressources, l'historique du peuplement et de l'occupation de l'espace, l'évolution des règles foncières locales, du droit coutumier, etc. Puis des enquêtes approfondies au niveau des cuvettes ont été réalisées pour identifier et évaluer les filières des différentes productions les plus porteuses, identifier les acteurs dans les filières agro-sylvo-pastorales et surtout la place des femmes dans ces filières.

RESULTATS ET DISCUSSION

Etude des performances des moyens techniques de lutte contre l'érosion éolienne

Concernant les moyens d'amélioration des techniques traditionnelles de fixation des dunes utilisées dans la région, MALAM ASSANE a conduit deux études. La première porte sur l'évaluation du potentiel en semences viables des sols dunaires dégradés du Département de Gouré. C'est ainsi que

MALAM ASSANE *et al.* (2018) ont évalué le stock semencier des sols dunaires dégradés ou partiellement dégradés au niveau de 32 sites. Ils ont montré que les sols ont une couleur qui varie du rouge jaunâtre 5Y/R (7/6) au jaune brunâtre 10YR (6/6) dans les cinq premiers centimètres. Ces sols sont sableux et comportent une proportion élevée de sables (99 à 100 %) fins et grossiers (KARIMOU BARKE, 2005 ; MALAM ASSANE *et al.*, 2016). Les sols dunaires contiennent également des éléments chimiques en très faible quantité mais relativement plus abondants au niveau des zones de dépôts d'édifices dunaires. Malgré les caractéristiques physico-chimiques défavorables pour la mise en culture de ces sols, ils contiennent un stock non négligeable de semences (MALAM ASSANE *et al.*, 2018). Ce stock de graines diffère d'abord selon le type de dune et selon la position topographique sur la dune. Les dunes isolées (taux de germination de 79 %) contiennent plus de stock de semences viables que les champs de dunes (taux de germination de 21 %). La quantité de semences est aussi plus importante au niveau des dunes partiellement dégradées que dans les dunes totalement dégradées. Cependant, la différence de stock de semences viables n'est pas significativement différente entre les deux. Quel que soit le type de dune ou le niveau de dégradation des dunes, le maximum de semences viables est toujours contenu dans le sol provenant des échantillons prélevés sur les fronts dunaires. Cela s'observe sur le terrain par une couverture herbacée qui n'est pas uniforme en fonction de la position topographique. C'est pourquoi, MALAM ASSANE *et al.* (2018) recommandent aux ONG et projets qui interviennent dans la récupération des sols dunaires dégradés de faire un ensemencement dans les zones de déflation (plat) et les sommets de dune (crête) après la fixation mécanique des dunes afin de stimuler la couverture végétale herbacée.

MALAM ASSANE *et al.* (2018) ont aussi observé le spectre biologique au niveau des graines germées. Ces graines germées sont constituées par neuf espèces dont 91 % appartiennent à la famille des Poaceae représentées par : *Alysicarpus ovalifolius*, *Aristida funiculata*, *Brachiaria xantholeuca*, *Cenchrus biflorus*, *Dactyloctenium aegyptium* et *Eragrotis tremula*. *Cenchrus biflorus*. Elles représentent à elles seules près de 80 % du nombre de graines germées. Les autres espèces sont au nombre de trois et se répartissent en trois familles : Asclepiadaceae (représentée par *Pergularia tomentosa*), Commelinaceae (représentée par *Commelina forskalaei*) et Cyperaceae (représentée par *Cyperus amabilis*).

La deuxième étude de MALAM ASSANE *et al.* (2016) a évalué les effets de trois types de matériaux utilisés dans la fixation des dunes sur la dynamique érosive et la restauration du potentiel écologique du site expérimental de N'Guel Magagi. Pour fixer les dunes dans le sud-est du Niger, un clayonnage est érigé à l'aide soit de branchages de *Leptadenia pyrotechnica* et pavage de rachis de doum (P LP + RHT), soit de branchages de *Leptadenia pyrotechnica* (P LP), soit de branchages de rachis de doum (P RHT). Ce clayonnage est disposé perpendiculairement aux vents dominants d'harmattan et a pour rôle de casser la force du vent, réduisant ainsi le flux de particules qu'il transporte.

Les mesures de flux éoliens menées en continu du 26 janvier au 25 mai 2014 par MALAM ASSANE *et al.* (2016) en amont et en aval sur trois types de fixation de dune ont permis de mettre en évidence les performances du clayonnage à l'aide des branchages P LP + RHT par rapport au clayonnage à l'aide de branchages de P LP et au clayonnage à l'aide de P RHT.

MALAM ASSANE *et al.* (2016) ont montré que les flux éoliens moyens mesurés à 2 m, 5 m, 10 m et 15 m sous le vent du clayonnage à l'aide de branchages de *Leptadenia pyrotechnica* et pavage de rachis de doum sont réduits respectivement de 56 %, 68 %, 42 % et 48 %. Alors que le clayonnage à l'aide de branchages de *Leptadenia pyrotechnica* réduit en moyenne de 44,3 % le flux éolien en aval contre 34,5 % pour le clayonnage à l'aide de rachis de doum. En effet, les performances élevées de la méthode P LP + RHT par rapport à celles de la P LP et de la P RHT s'explique par sa double fonction : la claie linéaire casse la vitesse du vent tandis que le mulching augmente la rugosité du sol et il retient les grains de sable sur place.

MALAM ASSANE *et al.* (2016) ont signalé que les flux éoliens sont plus importants au vent que sous le vent. Au vent, les flux éoliens ont tendance à diminuer au fur et à mesure que l'on se rapproche de la première palissade tandis que, sous le vent, ils diminuent successivement lorsqu'on s'éloigne de celle-ci, et cela jusqu'à une certaine distance.

MALAM ASSANE *et al.* (2016) ont observé entre la période allant du 8 décembre 2013 au 13 février 2015, une accumulation de sable en amont et aval du clayonnage formant ainsi une petite dune artificielle. En amont du clayonnage, la hauteur moyenne de dépôt de sable est de 55 cm et, en aval, à

2 m et à 5 m, cette hauteur est respectivement de 45 cm et 22 cm, quel que soit le type de matériau utilisé pour la fixation mécanique. Ces dépôts entraînent une diminution mensuelle de la hauteur des palissades de l'ordre de $5,57 \text{ cm} \pm 6,61 \text{ cm}$, quel que soit le type de matériau utilisé. La dégradation des palissades s'explique par le dépôt des sédiments transportés par le vent qui réduisent ainsi progressivement leur hauteur auquel s'ajoute la dégradation physique des matériaux avec le temps.

Hydrogéologie des cuvettes du Manga

Le second sujet développé au niveau de cette recherche est la caractérisation de l'hydrogéologie des cuvettes oasiennes à travers des prospections géoélectriques et l'évaluation de la recharge de l'aquifère en suivant un réseau de piézomètres installés dans les cuvettes.

Les prospections géoélectriques au niveau des cuvettes de Balla, Kilakina et d'Iskour ont permis de décrire la nature et les différentes couches géologiques dans la zone d'étude. D'une façon générale, la succession lithologique ou succession de couches du bas vers le haut se résume comme suit (NAFAHR *et al.*, 2016 ; NAFAHR, 2017) :

- socle - argiles sableuses - sables graveleux - sables fins à moyens graveleux et argileux et des sables fins à moyens argileux - sables dunaires (cuvette de Kilakina) ;
- socle - sables fins argileux - sables grossiers - argiles sableuses et silteuses - sables dunaires (cuvette de Balla) ;
- socle - grès - alternance silts argileux, graviers, sables argileux graveleux, sables, silts argileux et sables graveleux - sables dunaires (cuvette d'Iskour).

L'interprétation des coupes électriques des sondages confirme que le socle en profondeur représente le sous-bassement des formations. La couche sablo-argileuse ou argilo-sableuse pourrait correspondre aux dépôts du lac Tchad ancien datant des périodes humides du Ghazalien de 35000 ans à 22000 ans BP et du Nigéro-Tchadien de 12000 à 7000 ans BP (DURAND & MATHIEU, 1980). Ces périodes ont été marquées par l'extension du lac Tchad, l'érosion des crêtes dunaires, le remblaiement partiel des dépressions interdunaires ainsi que des dépôts palustro-lacustres dans les creux du modelé dunaire (DURAND & MATHIEU, 1980).

La couche sableuse provient de l'ancien erg aplani par la transgression lacustre du Ténére. Elle contient des proportions importantes d'argiles et/ou de silt et présente une épaisseur avoisinant la trentaine de mètres (FAURE, 1966).

La couche d'argiles et/ou de silts plus de l'évaporite en surface, souvent mélangée à des sables pouvant atteindre 12 m d'épaisseur, constituent les matériaux récents de comblement de la cuvette (MALEY, 2000).

NAFAHR *et al.* (2016) et NAFAHR (2017) ont démontré, à travers la description lithologique (géophysique), l'existence d'un ancien cours d'eau antérieur à la mise en place des cuvettes de Kilakina et d'Iskour. À Balla, la description lithologique a fait ressortir une sédimentation qui serait le vestige d'un vaste et profond épandage d'eau intervenu sur les deux phases de transgression citées plus haut.

Ces successions de couches correspondent à plusieurs phases de dépôts durant le Quaternaire. Il s'agit d'une alternance des dépôts de type marin (argiles sableuses en profondeur) reposant sur le socle, des dépôts de type fluvio-éoliens (sables graveleux) et des dépôts de type lacustre (évaporites). Ces résultats corroborent plusieurs études effectuées dans le bassin du lac Tchad (PIAS, 1968 ; SERVANT & SERVANT 1970 ; GAULTIER, 2004).

Cette étude géophysique a aussi confirmé l'appartenance de la cuvette d'Iskour au bassin de la Korama (en raison de la présence des grès identiques à ceux observés par GREIGERT (1978) et par SANDAO (2013) dans l'aquifère des grès du Quaternaire ancien ou grès de Mallawa) et les cuvettes de Balla et Kilakina au bassin du lac Tchad (GREIGERT, 1978), notamment le système phréatique du Manga (constitué par des sables au sommet, des argiles sableuses en profondeur, des formations du Tchad, dépôts quaternaires fluviales, deltaïques et lacustres d'extension considérable).

Aussi, la géophysique a montré que les eaux profondes au droit des cuvettes présentent des fortes valeurs de conductivité qui serait liée à la présence des argiles et/ou silts qui sont considérés comme porteurs des éléments responsables de la forte conductivité électrique des eaux.

L'équipe des hydrogéologues a aussi étudié l'évolution de la dynamique des niveaux statiques de nappes au sein des cuvettes de N'Guaguirguijé, Iskour et Balla ainsi que les paramètres physico-

chimiques des eaux souterraines. ISSA *et al.* (2016) et SOULEY (2017) ont noté une dynamique progressive des niveaux des nappes avec des périodes des hautes eaux et des périodes des basses eaux. Dans les cuvettes d'Iskour et de N'Guaguirguijé, les périodes de remontée (novembre-décembre et juin-août) et de baisse (janvier-juin et septembre-fin novembre) du niveau de nappe sont identiques. La cuvette de Balla présente une variation du niveau de nappe inverse entre son centre et sa périphérie. Une première remontée pendant la période sèche de janvier à fin mars et la deuxième remontée débute juste après la saison pluvieuse (septembre) et s'achève en décembre. La période des basses eaux commence en mars et continue jusqu'au mois de juin.

Les résultats obtenus par ISSA *et al.* (2016) et SOULEY (2017) ont montré que la variation du niveau statique des cuvettes est fonction de la profondeur du niveau de nappe. Cette variation est très importante dans les cuvettes d'Iskour (cuvette à eau affleurante, niveau de la nappe au centre de la cuvette inférieur à 0,5 m) avec 44 cm à 55 cm et de N'Guaguirguijé (cuvette à eau intermédiaire, niveau de la nappe phréatique au centre de la cuvette compris entre 0,5 et 3 m) avec 34 cm à 45 cm. Dans la cuvette de Balla (cuvette à eau profonde, niveau de la nappe phréatique au centre de la cuvette supérieur à 3 m), elle varie de 16 cm à 24 cm.

Du point de vue physique, ISSA *et al.* (2016) et SOULEY (2017) ont montré que les températures des eaux dans les cuvettes sont proches de la valeur de température ambiante. Elles varient de 24°C à 32°C avec une moyenne de 29,7°C avec des valeurs plus élevées dans les cuvettes de Balla et N'Guaguirguijé. Le pH des eaux des cuvettes augmente de la périphérie au centre de la cuvette et aussi de la cuvette à eau affleurante à la cuvette à eau profonde. Les eaux sont légèrement acides et tendent vers la neutralité avec un pH qui varie de 6,2 à 7,4. La minéralisation de tous les échantillons montre que les eaux souterraines issues de la cuvette de Balla (cuvette à eau profonde) sont plus minéralisées que celles des cuvettes d'Iskour et N'Guaguirguijé (cuvettes à eau affleurante et à eau sub-affleurante). La minéralisation est plus élevée également au centre qu'à la périphérie de la cuvette. La conductivité décroît de la périphérie vers le centre pour les cuvettes à eau peu profonde contrairement à la cuvette à eau profonde où les conductivités sont plus élevées et plus concentrées au centre de celle-ci.

Les analyses des paramètres chimiques (ISSA *et al.*, 2016 ; SOULEY, 2017) ont révélé également une grande variabilité chimique des eaux souterraines d'une cuvette à une autre. C'est ainsi que la cuvette à eau affleurante (Iskour) présente un hydro-faciès bicarbonaté sodique, la cuvette à eau sub-affleurante (N'Guaguirguijé) possède un hydro-faciès bicarbonaté calcique et la cuvette à eau profonde présente trois hydro-faciès de son centre vers sa périphérie : faciès sulfaté sodique, faciès sulfaté calcique et faciès bicarbonaté calcique.

ISSA *et al.* (2016) et SOULEY (2017) ont aussi apprécié l'aptitude des eaux souterraines des cuvettes à la consommation humaine et à l'irrigation. Ainsi, en comparant les résultats de l'analyse physico-chimique des eaux des cuvettes Iskour, N'Guaguirguijé et Balla aux normes de l'Organisation mondiale de la santé (OMS), ils ont montré que les eaux de certains piézomètres ne sont pas aptes à la consommation humaine ou à l'irrigation. Par exemple, les eaux souterraines de la cuvette de N'Guaguirguijé sont de bonne qualité pour l'irrigation mais elles sont polluées à sa périphérie ($\text{NO}_2 > 0,3 \text{ mg/l}$). Au niveau de la cuvette de Balla, les eaux souterraines de sa plage centrale ne sont pas aptes à la consommation humaine et sont de qualité médiocre pour l'irrigation. Par contre, les eaux souterraines de la cuvette d'Iskour présentent des teneurs en paramètres physico-chimiques inférieures aux normes de l'OMS. Elles sont donc utilisables pour la consommation humaine et pour l'irrigation.

Description spatiale et indicateurs de potentialité et de dégradation des cuvettes

Pour répondre à la thématique centrale du PIC-REC-Gouré-2 qu'est la préservation des cuvettes oasiennes (AMBOUTA, 2006) et de leur rôle socio-économique, une troisième approche utilise la télédétection et les systèmes d'informations géographiques. En utilisant des images de très hautes résolutions (SPOT 5-THX de 2,5 m de résolution), KARIMOU BARKE *et al.* (2015b) ont permis de réaliser l'inventaire de l'ensemble des cuvettes oasiennes du Département de Gouré avec des méthodes automatiques de traitement d'images satellitaires. Une première information originale, à savoir le nombre, la position et la surface de l'ensemble des cuvettes sur la zone d'étude est fournie grâce à cet inventaire. Le nombre total de cuvettes oasiennes ($> 0,2 \text{ ha}$) dans le Département de Gouré est ainsi estimé à 10717 avec une superficie totale de 33450 ha.

Cet inventaire des cuvettes, stocks de ressources, était une première étape obligatoire avant l'élaboration et la mise en place des indicateurs globaux de dégradation et de potentialité des cuvettes prenant en compte autant les processus d'ensablement éoliens que ceux liés au rabaïssement des nappes.

Pour cela, deux études de caractérisation plus poussée des cuvettes oasiennes ont été conduites par KARIMOU BARKÉ (2017). La première porte sur la caractérisation morphologique des cuvettes oasiennes. La deuxième est une identification et une caractérisation des unités paysagères des cuvettes oasiennes et de leurs alentours à l'aide des images SPOT 5-THX.

Les résultats de ces deux études ont permis de déterminer pour chaque cuvette, la taille, la superficie, la forme, la dimension fractale, l'orientation du grand axe de la cuvette, et des indicateurs de potentiel et contraintes de cuvettes. Les indicateurs de potentiel agricole de cuvette se répartissent en :

- indicateur de surface cultivable de cuvette qui représente le pourcentage des superficies cultivables de cuvette (rapport entre les surfaces cultivables et la surface totale de la cuvette). Les superficies cultivables comprennent des zones de savane herbeuse et de cultures de cuvette ainsi que les surfaces de cuvette en jachère.

- niveau d'exploitation des surfaces cultivables de cuvette qui est le rapport entre les surfaces cultivées et les surfaces cultivables ;

- pourcentage des surfaces boisées de cuvette qui est le rapport des surfaces boisées (savane arborée et savane arborée dégradée) d'une cuvette sur la surface totale de la cuvette.

Les indicateurs de contraintes concernent le pourcentage des surfaces de dépôts sableux des cuvettes (rapport entre les surfaces de dépôt à l'intérieur d'une cuvette et la superficie totale de la cuvette) et les indicateurs de menace des cuvettes. Ces derniers sont de deux types : les indicateurs de menace immédiate et les indicateurs de menace à long terme de cuvette. La menace est dite immédiate si la dune vive se trouve dans une couronne de 500 m de large autour de la cuvette (PSRDA_{500m}) et à long terme si elle se localise dans la couronne comprise entre 500-1000 m des limites de la cuvette (PSRDA_{500-1000m}).

Concernant l'évolution récente de ces cuvettes, KARIMOU BARKE *et al.* (2018) ont indiqué une régression des superficies des cuvettes oasiennes de 1984 à 2013 et une augmentation de leur nombre. Ils ont aussi noté une forte pression anthropique sur les unités d'occupation des sols des abords de cuvette, notamment les superficies des édifices dunaires et des vallées sèches à cultures pluviales qui ont augmenté de 30 % de 1984 à 2013. L'augmentation de ces unités s'est faite au détriment des surfaces des édifices dunaires à steppe arborée et/ou arbustive. Cette mise en culture de plus en plus étendue des abords des cuvettes a facilité la dégradation des terres dunaires et la remise en mouvement du sable en direction des cuvettes oasiennes. Ceci est à la base de la fragmentation de certaines cuvettes du fait de leur dégradation mais aussi de la réduction des superficies totales des cuvettes oasiennes de 1984 à 2013.

Enfin, KARIMOU BARKE (2017) a utilisé une interface informatique qui permet non seulement un accès aisé à ces informations obtenues sur les cuvettes lors des études précédentes mais il met aussi en évidence les cuvettes à risque nécessitant une intervention rapide pour leur conservation.

Analyse socio-économique

Le volet socio-économique dans cette recherche pluridisciplinaire et pluri-institutionnel s'est intéressé non seulement aux pratiques foncières dans les cuvettes oasiennes mais aussi à l'importance socio-économique des productions agricoles de ces cuvettes oasiennes (MALAM BOUKAR, 2016).

L'analyse du foncier dans et autour de neuf cuvettes oasiennes (Balla, Goguiné, Daguel, Kilakina, Dounia Koura, N'Guelguirguigé, N'Guelguidadé, Iskour et Gassafa) du Département de Gouré a permis d'identifier les différents modes d'accès à la terre.

D'après les résultats de MALAM BOUKAR *et al.* (2016a) et MALAM BOUKAR (2016), dans le sud-est du Niger, l'héritage est le mode le plus répandu pour accéder à la terre. La proportion des exploitants ayant hérité de leurs parcelles représente 86 % au niveau des cuvettes à eau affleurante à vocation agricole, 64 % au niveau des cuvettes à eau intermédiaire à vocation agro-pastorale et 81 %

au niveau des cuvettes à eau profonde à vocation pastorale. Les autres modes d'accès à la terre concernent par ordre d'importance le prêt, le don, le leg et l'achat.

Le mode d'accès récent de la terre est l'achat (5 % des exploitants). Il commence à faire son entrée comme mode privilégié d'accès des terres de cuvette, notamment les plus fertiles. L'accès aux terres des cuvettes est règlementé par le code rural. Au niveau du Département de Gouré, c'est la commission foncière départementale (COFOD) qui est chargée de règlementer l'accès aux terres et au niveau local c'est la commission foncière de base (COFOB). À noter que MALAM BOUKAR *et al.* (2016a) ont montré l'ineffectivité et l'inopérationnalité des commissions foncières dans le Département de Gouré et cela s'explique par le fait que la preuve de propriété foncière se fait par témoignage. En effet, 94 % des exploitants affirment avoir prouvé l'accès à leurs terres à l'aide des témoignages. Les pratiques locales et coutumières régissent et régulent le foncier (MALAM BOUKAR *et al.*, 2016a).

Toutefois, ces auteurs soulignent que l'accès à la terre de cuvette est difficile pour les femmes, notamment chez les Peulhs où elles sont soustraites de l'exploitation des cuvettes pour cause de la claustration. C'est pourquoi, seulement quatre femmes sont chefs de ménage sur la totalité des 105 ménages agricoles de l'échantillon.

En plus du foncier, MALAM BOUKAR *et al.* (2016b) se sont aussi intéressés à l'importance et à la rentabilité des cultures pratiquées dans les cuvettes. Après un entretien avec 28 groupes de spéculations sur la rentabilité des cultures de cuvettes, la canne à sucre et le manioc constituent les spéculations les plus rentables dans les cuvettes à eau affleurante et à eau intermédiaire. Dans les cuvettes à eau profonde, ce sont le manioc et le chou qui représentent les cultures les plus rentables. En dehors de la perception des producteurs sur des produits agricoles rentables, MALAM BOUKAR *et al.* (2016b) ont utilisé un test statistique non paramétrique (test de *Kendall*) pour identifier les produits agricoles les plus rentables. La hiérarchisation des principales spéculations selon le test de *Kendall* classe par ordre de rentabilité décroissant les cultures comme suit : oignon (69 %), chou (65,5 %), patate douce (63,5 %), manioc (62,8 %), canne à sucre (56,7 %). Les cultures à cycle court se révèlent plus rentables par rapport aux cultures à cycle long notamment le manioc et la canne à sucre à cause des charges intermédiaires plus élevées. Les cultures à cycle court ont l'avantage d'être pratiquées deux à trois fois par an.

En effet, l'analyse des indicateurs de rentabilité financière et économique de MALAM BOUKAR *et al.* (2016b) révèle une rentabilité des principales spéculations, puisque les rentabilités privées nettes (RPN) dépassent les 50 %. Autrement dit, les bénéfices générés d'une exploitation dépassent de moitié les capitaux investis. En plus, le passage des valeurs économiques aux valeurs sociales a permis de déterminer la rentabilité sociale nette (RSN) de certaines spéculations. C'est le cas du chou qui est socialement plus rentable, puisque la RSN est positive, alors que la patate douce a une RSN négative.

MALAM BOUKAR (2016) relève encore le problème de la filière d'écoulement des productions en cuvette. L'écoulement des produits agricoles de cuvette est confronté à de multiples problèmes dont celui du transport en raison de l'enclavement de la zone et de l'état sablonneux des routes auxquels s'ajoute le caractère périssable de certains produits agricoles de cuvette. Ces difficultés ont fait l'objet de propositions de mesures correctives et d'amélioration. Parmi ces mesures, il y a l'introduction de nouvelles pratiques alimentaires, à travers la valorisation des dérivés de certains produits agricoles comme le manioc et l'introduction de nouvelles cultures porteuses comme le Moringa, ainsi que le désenclavement des zones de production, à travers la construction de routes convenables et adaptées au contexte oasien.

CONCLUSION

Alors que la première phase du projet avait pour objectif une meilleure compréhension des processus à la base de la dégradation des systèmes oasiens du Manga et l'établissement d'un état des lieux de la dégradation liées aux processus éoliens, la seconde phase, elle, s'était donné pour mission de contribuer au développement durable de cet écosystème particulier du Manga.

Le développement durable de l'écosystème oasien du Manga passe d'abord par l'amélioration des techniques de lutte contre les ensablements des zones à haut potentiel que sont les cuvettes et le

développement d'infrastructures (routes, pistes, bâtiments,...). Cette menace d'ensablement est majeure dans la zone d'étude. A ce titre, les recherches entreprises dans le projet ont proposé une diversification des moyens techniques de lutte contre les dunes dégradées et elles ont aussi permis une avancée dans la compréhension de la réserve en semences viables sur différents types de dunes, semences essentielles à la fixation naturelle des dunes. Ces travaux de recherche permettent dès aujourd'hui de conseiller les organisations chargées de fixer les dunes pour rendre leurs méthodes plus efficaces.

La meilleure connaissance sur l'hydrogéologie de la zone d'étude, tant sur l'estimation de l'eau disponible que de sa qualité pour différents types de consommation va permettre de prendre ces informations en considération pour une gestion de l'eau qui optimisera la réserve disponible et l'utilisera de manière appropriée en fonction de sa qualité.

Les travaux réalisés dans ce projet ont également permis d'avoir cette vision synoptique sur l'ensemble des cuvettes de la zone du Manga et de leurs alentours. Plus de 10000 cuvettes de superficie supérieure à 0,2 ha ont été répertoriées, localisées et estimées au niveau de leurs surfaces. Ce travail d'inventaire, basé sur des informations spatiales fournies par des images satellites, a été automatisé dans un système d'information géographique. Il permet de caractériser les cuvettes du Manga en termes de potentialités agricoles et forestières et en termes de niveau de dégradation et de risque de dégradation dans un futur proche. L'outil proposé constitue une base solide pour la mise en place d'un système de suivi permanent de la zone mis à la disposition des autorités.

Enfin, la dernière partie du programme s'est intéressée au volet socio-économique de la zone d'étude. Il s'agissait d'identifier et d'analyser les raisons sociales, économiques et environnementales susceptibles d'expliquer la sous-exploitation des cuvettes oasiennes. Il ressort de l'analyse que le foncier de la zone est un obstacle à son développement et que les outils mis en place pour donner l'accès aux terres sont très peu opérationnels. Cela est d'autant plus regrettable que toutes les cultures principales de la zone ont montré leur forte rentabilité économique. Il faut encore reconnaître une autre difficulté importante de la région qui est son caractère très enclavé. Les filières actuelles d'écoulement des productions des cuvettes sont peu développées ce qui ne pousse pas les habitants des cuvettes à produire. Des propositions de construction de routes convenables et adaptées au contexte oasien, et des techniques de conservation des produits rapidement périssables ont été faites.

En définitive, les deux phases du projet ont permis aux partenaires d'acquérir de nouvelles compétences d'un très bon niveau scientifique qui devraient leur permettre d'appuyer les autorités nigériennes dans la mise en place d'une lutte structurée contre la dégradation des sols de ce pays. Ces compétences pourront aussi être valorisées dans toute la zone sahélienne et de manière plus générales dans toutes les régions arides et semi-arides du globe. Le renforcement des compétences de l'Université Abdou Moumouni de Niamey dans le domaine de la conservation des sols et de la lutte contre la désertification était l'objectif majeur de ces deux phases de projet et il est atteint.

BIBLIOGRAPHIE

- AMBOUTA K.J.M., 2006. Rapport de caractérisation des sols des cuvettes et bas-fonds de la zone d'intervention du projet de lutte contre l'ensablement des cuvettes oasiennes dans les départements de Gouré et de Maïné-Soroa : possibilités d'exploitation agricole et de valorisation. Gouré, Niger, 53 p.
- BODART C. & OZER A., 2009. Apports de la télédétection dans l'étude de la remise en mouvement du sable dunaire dans la région de Gouré (sud-est du Niger). *Geo-Eco-Trop*, 33: 57-68.
- DE LONGUEVILLE F., HENRY S. & OZER P., 2009. Saharan dust pollution: Implications for the Sahel? *Epidemiology*, 20: 780.
- DE LONGUEVILLE F., HOUNTONDI Y.C., OZER P., MARTICORENA B., CHATENET B. & HENRY S., 2013. Saharan dust impacts on air quality: what are the potential health risks in West Africa? *Human and Ecological Risk Assessment*, 19: 1595-1617.
- DURAND A. & MATHIEU P., 1980. Evolution paléogéographique et paléoclimatique du bassin tchadien au Pléistocène supérieur. *Revue de Géologie Dynamique et de Géographie Physique*, 22: 329-341.
- FAURE H., 1966. Reconnaissances géologiques des formations sédimentaires post-paléozoïques du Niger oriental. *Mémoires du Bureau de Recherches Géologiques et Minières (Paris)*, 47, 630 p.

- GAULTIER G., 2004. Recharge et paléo-recharge d'une nappe libre en milieu sahélien (Niger oriental): approches géochimique et hydrodynamique. Thèse de doctorat en Terre, Océan, Espace, Université Paris Sud Orsay, Paris, France, 179 p.
- GEMENNE F., BLOCHER J., DE LONGUEVILLE F., VIGIL DIAZ TELENTI S., ZICKGRAF C., GHARBAOUI D. & OZER, P., 2017. Changement climatique, catastrophes naturelles et mobilité humaine en Afrique de l'Ouest. *Geo-Eco-Trop*, 41: 317-337.
- GREIGERT J., 1978. Atlas des eaux souterraines du Niger. Etat des connaissances, Rapport BRGM, 79 AGE001, Orléans, France.
- HOUNTONDJI Y.C., NICOLAS J., SOKPON N. & OZER P., 2005. Mise en évidence de la résilience de la végétation sahélienne par télédétection basse résolution au Niger à la suite d'épisodes de sécheresse. *Belgeo*, 4 / 2005: 499-516.
- ISSA S., BROUYERE S., OUSMANE B., TYCHON B., ORBAN P. & DASSARGUES A., 2016. Suivi de la variation du niveau de la nappe et qualité des eaux dans les cuvettes du Département de Gouré, sud-est du Niger. Colloque international sur la préservation et l'utilisation durables des systèmes oasiens, 28-29 septembre 2016, Université Abdou Moumouni, Niamey, Niger, 31-33.
- KARIMOU BARKE M., 2005. Caractérisation morpho-pédologique des cuvettes de Tchago et Worro (dans le Département de Gouré). Mémoire d'Ingénieur des Eaux et Forêts, Université Abdou Moumouni, Niamey, Niger, 87 p.
- KARIMOU BARKE M., 2017. Caractérisation et élaboration d'un outil de monitoring des cuvettes oasiennes et de leurs alentours par télédétection et système d'information géographique. Thèse de doctorat, Université de Liège, Liège, Belgique, 192 p.
- KARIMOU BARKE M., AMBOUTA K.J.M., SARR B. & TYCHON B., 2015a. Analyse des phénomènes climatiques extrêmes dans le sud-est du Niger. *Publications de l'Association Internationale de Climatologie*, 28: 537-542.
- KARIMOU BARKE M., TYCHON B., OUSSEINI I. & OZER A., 2015b. Détection des cuvettes oasiennes du Centre-Est du Niger par classification d'une image texturale basée sur la variance. *Photo-Interprétation*, 51: 24-36.
- KARIMOU BARKE M., TYCHON B., OUSSEINI I., AMBOUTA K.J.M. & LAMINO M.O., 2018. Analyse de l'évolution des paysages de cuvettes oasiennes et de leurs alentours dans le centre-est du Niger, *Geo-Eco-Trop*, 42: 259-273.
- KARIMOUNE S., 1994. Géomorphologie de la région de Zinder (Niger): Damagaram et Plateau du Koutous. *Geo-Eco-Trop*, 18: 1-218.
- KARIMOUNE S., SIDI TANKO O.K. & ISSIAKA H., 2017. Variabilités climatiques et évolution de l'occupation des sols dans l'oasis de Timia, Région d'Agadez, Niger. *Geo-Eco-Trop*, 41: 359-374.
- MAINGUET M., CANON-COSSUS L. & CHEMIN M.C., 1979. Dégradation dans les régions centrales de la République du Niger : Degré de responsabilité de la nature du milieu, de la dynamique externe et de la mise en valeur par l'homme. *Travaux de l'Institut de Géographie de Reims*, 39-40: 61-73.
- MALAM ASSANE M., AMBOUTA K.J.M., BIELDERS C., TIDJANI A.D., JACQUEMART A.L. & LAMINO MANZO O., 2018. Evaluation du potentiel en semences viables des sols dunaires dégradés de Gouré (sud-est du Niger). *Geo-Eco-Trop*, 42: 307-320.
- MALAM ASSANE M., TIDJANI A.D., AMBOUTA K.J.M. & BIELDERS C., 2016. Efficacité de différents matériaux utilisés dans la fixation des dunes sur la réduction des flux de sédiments et la restauration de la végétation en milieu dunaire du sud-est nigérien. Colloque international sur la préservation et l'utilisation durables des systèmes oasiens, 28-29 septembre 2016, Université Abdou Moumouni, Niamey, Niger, 19-22.
- MALAM BOUKAR A.K., 2016. Système d'exploitation et potentialités économiques des cuvettes oasiennes du sud-est nigérien. Thèse de doctorat, Université Abdou Moumouni, Niamey, Niger, 170 p.
- MALAM BOUKAR A.K., TIDJANI A.D., YAMBA B. & LEBAILLY P., 2016b. Performance et circuit de commercialisation des principaux produits des cuvettes oasiennes du Département de Gouré (Niger). *International Journal of Biological and Chemical Sciences*, 10: 2202-2214.
- MALAM BOUKAR A.K., YAMBA B., ANDRES L., & LEBAILLY P., 2016a. Les cuvettes oasiennes du Niger oriental: entre pratiques foncières et cadre législatif. *Revue Internationale des Sciences de Développement*, 4: 376-388.
- MALEY J., 2000. Les variations des niveaux du lac Tchad au cours du dernier millénaire: Rôle des conditions climatiques régionales et des apports fluviales. Comparaison avec le lac Naivasha en Afrique orientale. *Bulletin Méga-Tchad*, 1/2: 21-26.
- NAFAHR O.I., 2017. Contribution de la géophysique à la caractérisation des aquifères inter-dunaires de Gouré : cas des cuvettes de Balla, de N'Guaguirguijé, et d'Iskour. Mémoire de Master en Prospection et Gestion des Ressources en Eau Souterraine, Université Abdou Moumouni, Niamey, Niger, 69 p.
- NAFAHR O.I., ABDU BABAYE M.S., TIDJANI A.D. & OUSMANE B., 2016. Contribution de la géophysique à la caractérisation des aquifères inter-dunaires de la ville de Gouré/Zinder : Cas des cuvettes de

- Kilakina, de Balla et d'Iskour. Colloque international sur la préservation et l'utilisation durables des systèmes oasiens, 28-29 septembre 2016, Université Abdou Moumouni, Niamey, Niger, 29-30.
- ORANGE D., GAC J.Y., PROBST J.L. & TANRE D., 1990. Mesure du dépôt au sol des aérosols désertiques, une méthode simple de prélèvement: le capteur pyramidal. *Comptes Rendus de l'Académie des Sciences*, Série II, 311: 167-172.
- OZER P., 2002. Dust variability and land degradation in the Sahel. *Belgeo*, 2 / 2002: 195-210.
- OZER P., 2005. Estimation de la pollution particulaire naturelle de l'air en 2003 à Niamey (Niger) à partir de données de visibilité horizontale. *Environnement, Risques & Santé*, 4: 43-49.
- OZER P., BODART C. & TYCHON B., 2005. Analyse climatique de la région de Gouré, Niger oriental : récentes modifications et impacts environnementaux. *CyberGeo*. No.308, DOI: 10.4000/cybergeo.3338.
- OZER P., ERPICUM M., DEMARÉE G. & VANDIEPENBEECK M., 2003. The Sahelian drought may have ended during the 1990s. *Hydrological Sciences Journal*, 48: 489-492.
- OZER P., HOUNTONDJI Y.C. & LAMINOU MANZO O., 2009. Evolution des caractéristiques pluviométriques dans l'est du Niger de 1940 à 2007. *Geo-Eco-Trop*, 33: 11-30.
- OZER P., LAMINOU MANZO O., TIDJANI D., DJABY B. & DE LONGUEVILLE F., 2017. Evolution récente des extrêmes pluviométriques au Niger (1950-2014). *Geo-Eco-Trop*, 41: 375-383.
- PIAS J., 1968. Contribution à l'étude des formations sédimentaires tertiaires et quaternaires de la cuvette tchadienne et des sols qui en dérivent (République du Tchad). *Cahiers ORSTOM, Série Pédologie*, 6: 367-377.
- RAJOT J.L., 2001. Windblown sediment mass budget of Sahelian village land units in Niger. *Bulletin de la Société Géologique de France*, 172: 523-531.
- SANDAO I., 2013. Etudes hydrodynamique, hydrochimique et isotopique des eaux souterraines du bassin versant de la Korama/Sud Zinder, Niger : Impacts de la variabilité climatique et des activités anthropiques. Thèse de doctorat, Université Abdou Moumouni, Niamey, Niger, 196 p.
- SERVANT M. & SERVANT S., 1970. Les formations lacustres et les diatomées du Quaternaire récent du fond de la cuvette tchadienne. *Revue de géographie physique et de géologie dynamique*, 12: 63-76.
- SOULEY C.A., 2017. Contribution de l'hydrochimie à l'amélioration de connaissances des aquifères interdunaires de Gouré/Zinder. Mémoire de Master en Prospection et Gestion des Ressources en Eau Souterraine, Université Abdou Moumouni, Niamey, Niger, 58 p.
- TIDJANI A.A., OZER A. & KARIMOUNE S., 2009. Apports de la télédétection dans l'étude de la dynamique environnementale de la région de Tchago (nord-ouest de Gouré, Niger). *Geo-Eco-Trop*, 33: 69-80.
- TIDJANI A.D., 2008. Erosion éolienne dans le Damagaram Est (sud-est du Niger) : paramétrisation, quantification et moyens de lutte. Thèse de doctorat, Université catholique de Louvain, Louvain-La-Neuve, Belgique, 171 p.
- TIDJANI A.D., BIELDERS C.L. & AMBOUTA K.J.M., 2009. Dynamique saisonnière des paramètres déterminant l'érosion éolienne sur les pâturages dunaires du Niger oriental. *Geo-Eco-Trop*, 33: 39-56.
- TYCHON B. & AMBOUTA K.J.M., 2009. Gestion interdisciplinaire du problème de l'ensablement des cuvettes en milieu sahélien nigérien. *Geo-Eco-Trop*, 33: 1-10.
- TYCHON B., AMBOUTA K.J.M., OZER A., BIELDERS C., PAUL R. & OZER P., 2009. Quel avenir pour les cuvettes oasiennes dans le Niger oriental ? *Geo-Eco-Trop*, 33: III-VI.

