



Université de Liège  
Faculté des Sciences  
Département des Sciences et Gestion de l'Environnement

## **Caractérisation et élaboration d'un outil de monitoring des cuvettes oasiennes et de leurs alentours par télédétection et système d'information géographique**

**Mahamadou Salifou Karimou Barké**

Thèse présentée en vue de l'obtention  
du grade de Docteur en Sciences  
Avril 2017

Composition du jury :

Président: Pr Philippe André (ULg)  
Lecteurs : Pr Karimou Ambouta (UAM)  
Pr Charles Bielders (UCL)  
Dr Pierre Ozer (ULg)  
Pr André Ozer (ULg)  
Promoteurs : Pr Bernard Tychon (ULg)  
Dr Issa Ousseini (UAM)

Année Académique 2016-2017



## REMERCIEMENTS

Cette thèse est le résultat de cinq années de recherche en Belgique et au Niger. Durant cette période plusieurs personnes nous ont aidés et soutenus, c'est l'occasion pour nous de les remercier.

Je voudrais d'abord remercier l'Académie de Recherche et d'Enseignement Supérieur (ARES) du Royaume de Belgique qui a financé cette étude à travers le Projet Interuniversitaire Ciblé (PIC) dénommé REC-Gouré (Recherche sur l'Ensablement des Cuvettes oasiennes de Gouré) dont la thématique principale est la préservation des cuvettes oasiennes et de leur rôle socio-économique.

Je lui associe aussi le programme ISIS (Incitation à l'Utilisation Scientifique des Images SPOT) qui a gracieusement subventionné les images SPOT 5-THX utilisées par cette étude.

Toute ma reconnaissance va à mon directeur de thèse, Pr. Bernard TYCHON, qui a été présent tout au long de ces cinq années. Je le remercie de ses conseils avisés ainsi que pour la rigueur qu'il a su m'inculquer.

Je tiens à exprimer mes remerciements les plus sincères au Dr. Issa OUSSENI, mon co-promoteur de thèse, pour avoir supervisé mon travail, m'avoir fait bénéficier de ses conseils, de sa rigueur scientifique ainsi que pour son implication et son suivi de mon travail sur le terrain. Je lui exprime toute ma gratitude pour m'avoir accueilli et permis de travailler dans son bureau au Niger. Ces années passées à vos côtés m'ont permis d'évoluer et d'arriver à cette étape de soutenance qui est pour nous à la fois un point d'arrivée et de départ.

Mes remerciements vont aussi au Pr. Charles BIELDERS (Université Catholique de Louvain/Belgique) et au Pr. André OZER (Université de Liège), tous deux membres de mon comité de thèse. Votre soutien chaleureux et le partage de vos précieuses connaissances lors des réunions du comité de thèse ont toujours été efficaces tout au long de ces travaux.

Je tiens également à exprimer ma profonde gratitude au Pr. Philippe ANDRE (ULg), qui a accepté de présider le jury de thèse de doctorat, au Dr. Pierre OZER (ULg) et au Pr. Karimou AMBOUTA (UAM) pour avoir accepté d'apporter leurs appréciations au sein du jury de cette thèse.

Au Professeur Karimou AMBOUTA, je voudrais en plus lui adresser mes vifs et sincères remerciements de n'avoir ménagé aucun effort pour la réalisation de ce travail.

Merci également à mes deux camarades doctorants du PIC (Awa KOUROU et Mallam Assan MAIGARI) ainsi que tous les étudiants qui ont préparé leurs mémoires dans le cadre de ce projet. Je n'oublierai pas Gambo MOUSTAPHA et Ibrahim ZANAIDOU.

Toute ma gratitude va aussi à Didier TIDJANI, Professeur à l'Université Abdou Moumouni et Coordinateur local de PIC, pour ses précieux conseils. Je n'oublierai pas non plus les autres enseignants du Projet notamment Pr. YAMBA Boubacar, Dr Ouassa TIEKOURA, Dr Yahaya ABDOU et Dr Salifou KARIMOUNE. Je les remercie également de leurs conseils quant à l'orientation de ces travaux.

Que l'équipe de l'unité Eau, Environnement, Développement (Djaby BAKARY, Aziz DIOUF, Issa GARBA, Antoine DENIS, Moussa EL-JARROUDI, Marie LANG, Joost WELLENS, Ingrid JACQUEMIN, Hamid SALLAH, Julien MINET, Tarik BENABDELOUAHAB, Khadija SOSSEY, Yetkin Özüm DURGUN et Marie DUFRASNE), ainsi que tous les membres du personnel du Campus d' Arlon de l'Université de Liège (Lucia GUERMANT, Thomas BARTHEL et Roger THILL, Françoise DASNOY, Catherine HEYMAN, Monique et Lisbeth) trouvent tous ici ma reconnaissance. Je me souviendrai sans doute avec nostalgie de leur amabilité au cours des pauses café de 11 heures.

Je suis reconnaissant à Farid TRAORE, à Louis AMANI KOUADIO et à Hamid MAHYOU, tous anciens doctorants auprès du Pr. Bernard TYCHON, pour leurs conseils ainsi que tous les anciens étudiants du Campus d'Arlon avec lesquels j'ai sympathisé. Je n'oublierai pas aussi mon ami Damien ROSILLON ainsi que toute sa famille qui m'a accepté dans sa famille.

Je pense également au personnel de la Direction Départementale de l'Environnement de Gouré notamment aux Colonels Hamza BARMO et Soumana ISSIFOU, aux Capitaines Mamadou OUSMANE et Ibrahim BOUZOU, pour leur hospitalité tout au long de mes séjours à Gouré.

J'ai une pensée particulière pour mes parents à qui je dois beaucoup, pour mes frères et sœurs, ainsi que pour mes amis. Je ne finirais pas sans remercier

mon fils Misbahou, qui a supporté mes longs séjours en Belgique et sur le terrain à Gouré. Tu as été présent tout au long de ma thèse et particulièrement lors des moments difficiles. Je te dédie cette thèse.

Je voudrais également remercier toute la population de Gouré pour son accueil chaleureux et la disponibilité dont elle a fait montre.

Enfin, je remercie toutes les personnes, qui de près ou de loin, ont contribué à la réalisation de ce travail.

## TABLES DES MATIERES

REMERCIEMENTS .....	i
RESUME GENERAL .....	x
GENERAL ABSTRACT.....	xiii
LISTE DES FIGURES .....	xvi
LISTE DES TABLEAUX .....	xx
LISTE DES SIGLES ET ABREVIATIONS.....	xxiii
INTRODUCTION GENERALE.....	1
CHAPITRE I : CONTEXTE DE L'ETUDE.....	10
I.1. LOCALISATION GEOGRAPHIQUE .....	10
I.2. CARACTERISTIQUES DEMOGRAPHIQUES.....	10
I.3. CARACTERISTIQUES CLIMATIQUES.....	10
I.3.1. Régime et évolution des précipitations .....	10
I.3.2. Régime thermique.....	13
I.3.3. Régime des vents et ses incidences.....	14
I.4. CARACTERISTIQUES GEOLOGIQUES.....	16
I.4.1. Socle cristallin.....	16
I.4.2. Formations superficielles du Quaternaire .....	17
I.5. CARACTERISTIQUES HYDROGEOLOGIQUES .....	17
I.5.1. Aquifère de socle du Mounio.....	17
I.5.2. Aquifères sédimentaires du Quaternaire .....	17
I.6. CARACTERISTIQUES GEOMORPHOLOGIQUES.....	18
I.6.1. Secteur des reliefs résiduels du socle.....	18
I.6.2. Secteurs d'ergs et de dépressions inter-dunaires.....	18
I.6.2.1. <i>Les dunes transversales</i> .....	18
I.6.2.2. <i>Les dunes longitudinales</i> .....	18
I.6.2.3. <i>Cuvettes</i> .....	19
I.7. RESSOURCES DES CUVETTES OASIENNES ET DE LEURS ALENTOURS .....	20
I.7.1. Caractéristiques morpho-pédologiques.....	21

1.7.1.1. <i>Les sols des alentours de cuvettes</i> .....	21
1.7.1.2. <i>Les sols des cuvettes</i> .....	23
1.7.2. Caractéristiques de la couverture végétale.....	23
1.7.2.1. <i>La végétation des alentours des cuvettes</i> .....	23
1.7.2.2. <i>La végétation des cuvettes</i> .....	26
I.8. GESTION DES CUVETTES OASIENNES ET DE LEURS ALENTOURS .....	27
1.8.1. <i>Forme d'exploitation des cuvettes oasiennes et de leurs alentours.</i>	27
1.8.1.1. <i>L'exploitation pastorale</i> .....	27
1.8.1.2. <i>L'exploitation agricole</i> .....	29
1.8.1.3. <i>L'exploitation forestière</i> .....	30
1.8.1.4. <i>L'exploitation du natron</i> .....	32
1.8.2. <i>Intensité d'exploitation des cuvettes et types de dégradation</i> .....	33
 CHAPITRE II. DETECTION DES CUVETTES OASIENNES DU CENTRE-EST DU NIGER PAR CLASSIFICATION D'IMAGES SATELLITE SPOT 5-THX.....	36
 Introduction .....	36
II.1. METHODOLOGIE .....	36
II.1.1. <i>Reconnaissance de terrain et collecte des données</i> .....	39
II.1.1.1. <i>L'établissement de la nomenclature</i> .....	40
II.1.1.2. <i>La sélection et contrôle des zones d'entraînement</i> .....	40
II.1.2. <i>Description des trois méthodes</i> .....	41
II.1.2.1. <i>La méthode de classification par pixel</i> .....	41
II.1.2.2. <i>La méthode de classification par texture</i> .....	42
II.1.2.3. <i>La méthode de classification par objet</i> .....	48
II.1.3. <i>Evaluation des classifications réalisées</i> .....	49
II.2. RESULTATS ET DISCUSSION .....	52
II.2.1. <i>Evaluation de la classification</i> .....	52
II.2.2. <i>Comparaison des résultats obtenus par les trois (3) techniques d'analyses pixellaire, texturale et par objet</i> .....	59
II.2.3. <i>Quelques limites de la méthode de classification par objet</i> .....	65
Conclusion partielle.....	68

CHAPITRE III. CONTRIBUTION DE L'ANALYSE MORPHOLOGIQUE  
A L'ETUDE DES PROCESSUS DE FORMATION DES CUVETTES  
OASIENNES ET DE LEUR DYNAMIQUE..... 70

Introduction .....	70
III.1. METHODOLOGIE .....	72
III.1.1. Matériels.....	73
III.1.2. Détermination des paramètres .....	73
<i>III.1.2.1. L'indice de forme de Gravelius.....</i>	<i>73</i>
<i>III.1.2.2. L'orientation des cuvettes oasiennes .....</i>	<i>75</i>
<i>III.1.2.3. La dimension fractale .....</i>	<i>75</i>
III.2. RESULTATS ET DISCUSSION .....	78
III.2.1. Indice de forme de Gravelius des cuvettes oasiennes .....	78
III.2.2. Orientation générale des cuvettes oasiennes .....	86
III.2.3. Dimension fractale des cuvettes oasiennes .....	91
Conclusion partielle.....	100

CHAPITRE IV. IDENTIFICATION ET CARACTERISATION DES  
UNITES PAYSAGERES DES CUVETTES OASIENNES ET DE LEURS  
ALENTOURS ASSOCIES A L'AIDE DES IMAGES SPOT 5-THX ..... 102

Introduction .....	102
IV.1. MATÉRIEL ET MÉTHODES .....	102
IV.1.1. Données utilisées .....	102
IV.1.2. Méthodes.....	102
<i>IV.1.2.1. L'extraction des cuvettes oasiennes et de leurs alentours ..</i>	<i>102</i>
<i>IV.1.2.2. La reconnaissance, la catégorisation préliminaire et</i> <i>l'échantillonnage des cuvettes et leurs alentours .....</i>	<i>103</i>
IV.1.2.2.1. Caractérisation exploratoire de reconnaissance.....	103
IV.1.2.2.2. Elaboration de la clef d'interprétation.....	103
<i>IV.1.2.3. L'échantillonnage des cuvettes et leur environnement .....</i>	<i>106</i>
<i>IV.1.2.4. L'interprétation et le traitement des images SPOT 5-THX.</i>	<i>106</i>
<i>IV.1.2.5. L'évaluation de la classification .....</i>	<i>106</i>

IV.1.2.6. <i>L'élaboration d'indicateurs spatiaux de caractérisation....</i>	107
IV.4.3.6.1. Les indicateurs du potentiel valorisable .....	107
IV.4.3.6.2. Les indicateurs de menace et/ou de dégradation .....	109
IV.2. RÉSULTATS ET DISCUSSION .....	110
IV.2.1. Identification par télédétection des unités de paysage des cuvettes oasiennes et de leurs alentours .....	110
IV.2.1.1. <i>Les unités de paysage associées aux cuvettes oasiennes ....</i>	112
IV.2.1.2. <i>Les unités de paysages des cuvettes oasiennes .....</i>	117
IV.2.2. Indicateurs spatiaux de caractérisation des cuvettes .....	124
IV.2.2.1. <i>Les potentialités des unités de paysages de cuvettes.....</i>	124
IV.2.2.2. <i>Les contraintes des cuvettes.....</i>	127
IV.2.2.2.1. Indicateur de dégradation des cuvettes.....	127
IV.2.2.2.2. Indicateur de menace d'ensablement des cuvettes .....	128
Conclusion partielle.....	130
CHAPITRE V. ANALYSE DE L'ÉVOLUTION DES PAYSAGES DE CUVETTES OASIENNES ET DE LEURS ALENTOURS .....	132
Introduction .....	132
V.1. DONNÉES ET MÉTHODES DE TRAITEMENT .....	132
V.1.1. Données satellitaires.....	132
V.1.2. Méthodes d'établissement et d'évolution de la situation d'occupation des sols des unités de paysages de cuvettes et de leurs alentours à partir des données satellitaires .....	132
V.1.2.1. <i>L'extraction de la zone d'étude .....</i>	132
V.1.2.2. <i>L'analyse des données.....</i>	133
V.1.2.2.1. Etablissement de la nomenclature .....	133
V.1.2.2.2. Interprétation des images.....	134
V.1.2.3. <i>La méthode d'analyse de l'évolution des classes d'occupation des sols établies sur la base de la clé d'interprétation.....</i>	134
V.1.3. L'évaluation des classifications réalisées.....	135
V.2. RÉSULTATS ET DISCUSSIONS .....	135
V.2.1. Résultats de la validation des classifications d'image.....	135
V.2.2. Évolution des paysages de cuvettes et leurs alentours de 1984 à 2013 .....	136

V.2.2.1. <i>Les unités d'occupation des sols des paysages associés aux cuvettes</i> .....	136
V.2.2.2. <i>Les unités de paysages de cuvettes</i> .....	139
V.2.3. Analyse spatiale des causes d'augmentation du nombre des cuvettes oasiennes et de réduction de leurs superficies.....	139
Conclusion partielle.....	146

CHAPITRE VI. CONCEPTION ET REALISATION D'UN OUTIL DE MONITORING DES CONTRAINTES ET DES POTENTIALITES DES CUVETTES OASIENNES DU CENTRE-EST DU NIGER..... 148

Introduction .....

VI.1. MÉTHODOLOGIE..... 149

VI.1.2. Méthode de conception d'un système d'information de monitoring des cuvettes oasiennes..... 149

    VI.1.2.1. *La réalisation d'un modèle conceptuel et physique des données* .....

    VI.1.2.2. *La création de la base de données et intégration des données* .....

VI.1.3. Méthode d'estimation des paramètres d'un modèle de prédiction des cuvettes cultivées ou non cultivées .....

    VI.1.3.1. *Le choix des cuvettes oasiennes ayant servi à la calibration du modèle*.....

    VI.1.3.2. *La détermination des cuvettes oasiennes cultivées ou non* .

    VI.1.3.3. *La méthode de calibration du modèle de prédiction des cuvettes cultivées ou non* .....

VI.1.4. Méthode de validation des performances du modèle logistique 155

VI.2. RÉSULTATS ET DISCUSSIONS..... 156

VI.2.1. Description de la base de données du monitoring des cuvettes oasiennes .....

VI.2.2. Exploitation de la géodatabase..... 160

    VI.2.2.1. *Requête 1: Dans quelles cuvettes peut-on établir des programmes de développement de cultures irriguées (choux, laitue, tomate par exemple) ?*.....

<i>VI.2.2.2. Requête 2 : Affichez les cuvettes oasiennes qui subissent une menace immédiate très forte .....</i>	<i>162</i>
<i>VI.2.2.3. Requêtes 3 : Parmi les variables suivantes : la distance par rapport à la seule route goudronnée, distance par rapport aux marchés, distance par rapport aux villages, population du village le plus proche, présence ou absence d'un plan d'eau à l'intérieur de la cuvette, quelles sont les variables explicatives pertinentes de la mise en culture ou non des cuvettes ? .....</i>	<i>164</i>
Conclusion partielle.....	170
CONCLUSION GENERALE .....	171
REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES .....	176
ANNEXES : LISTE DES PUBLICATIONS .....	192

## RESUME GENERAL

Situées en zone semi-aride, les cuvettes oasiennes du centre-est du Niger sont des agro-écosystèmes à hautes potentialités. C'est seulement à l'intérieur de ces dernières que l'agriculture est possible durant toute l'année. Ces cuvettes oasiennes ont connu de nombreux investissements de la part de plusieurs ONGs et projets au cours des dernières années. Cependant, elles sont souvent peu connues par ces acteurs du développement du fait de leur grand nombre et de leur extrême diversité. Cette thèse cherche à réduire cette méconnaissance à travers les activités suivantes:

- Evaluer les performances de trois méthodes de classification d'images appliquées à la détection de ces cuvettes oasiennes dans le Département de Gouré. Ces méthodes sont l'analyse pixellaire, l'analyse texturale et l'analyse par objet. Elles sont appliquées à des images SPOT 5-THX de 2.5 m de résolution ;
- Caractériser la forme des cuvettes oasiennes avec deux indices morphologiques (l'indice de compacité de Gravelius et l'indice fractale de leurs contours) ainsi que leurs orientations en utilisant les secteurs de la rose de vent comme repères ;
- Evaluer les contraintes et potentialités liées aux unités de paysage des cuvettes et de leurs alentours pour l'ensemble des cuvettes oasiennes à partir des extensions de ces unités de paysage, élaborer des indicateurs spatiaux de caractérisation des cuvettes ;
- Analyser la dynamique de l'occupation des sols de cuvettes oasiennes et de leurs alentours en utilisant les images Landsat 5-TM de 1984, les images SPOT 3 de 1996 et les images SPOT 5-THX de 2013.
- Proposer un outil de monitoring et une esquisse de système expert orienté à partir des données récoltées par ce biais sur l'ensemble des cuvettes de la zone d'étude.

L'évaluation des résultats montre que l'approche par objet (précision globale égale à 97.12%, coefficient Kappa égal à 0.97) est plus performante que celles utilisant la texture (précision globale égale à 89.61%, coefficient Kappa égal à 0,90) et l'analyse par pixel (précision globale égale à 80.58 %, coefficient Kappa égal à 0.80). 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. Le nombre total de cuvettes oasiennes dans le Département de Gouré est ainsi estimé à 10717. Cet inventaire de ces lieux stocks de ressources est une première étape obligatoire pour leur caractérisation morphologique et pour l'évaluation de leurs potentialités agricoles.

L'indice de forme de Gravelius met en évidence une certaine diversité de leurs contours : des cuvettes circulaires (9%), ovales (47%), amiboïdes (11%), étirées (18%) et très étirées ou étirées-amiboïdes (16%). La dimension fractale permet de distinguer trois classes de cuvette selon le degré de lissage de ces contours : très lissées (39%), lissées (50%) et moyennement lissées (10%). Le lissage est interprété ici comme un indicateur d'éolisation des pourtours des cuvettes. Enfin la détermination de l'orientation des grands axes des cuvettes a permis d'identifier quatre secteurs majeurs : E-W (23%), N-S (21%), NE-SW (22%) et SE-NW (34%). Ces analyses morphologiques et d'orientation appliquées pour la première fois à l'ensemble des cuvettes oasiennes du Département de Gouré offrent des éléments permettant de comprendre les processus d'ensablement des cuvettes oasiennes dans cette zone.

L'analyse des indicateurs des potentialités naturelles à la mise en valeur agricole montre que les cuvettes oasiennes sont des espaces multi-usages, avec des aptitudes en arboriculture, maraîchage, en natron et en foresterie selon les unités géomorphologiques. Le pourcentage des surfaces cultivables est faible pour 45.8% des cuvettes et fort à très fort pour seulement 3.9 %. Celui des surfaces boisées est très fort sur 61.6 % des cuvettes soit 51.4 % en superficie. Les cuvettes possédant un sol nu à natron et/ou une nappe d'eau affleurante représentent 17.6 % des cuvettes. Quant aux indicateurs de risque de dégradation, ils montrent que 3.3 % et 0.5 % des cuvettes ont respectivement une menace d'ensablement forte et très forte à moyen terme. Alors qu'à terme immédiat, c'est respectivement 3% et 0.8 % des cuvettes dont la menace d'ensablement est forte et très forte.

Concernant l'évolution récente de ces milieux, les superficies des cuvettes oasiennes ont régressé de 46783 ha en 1984, à 40831 ha en 1996 et 34553 ha en 2013. Inversement, leur nombre a augmenté de 1984 (8911) à 2013 (10717). Ceci s'explique certes pour partie par les résolutions différentes des

images satellitaires utilisées, mais surtout par la fragmentation de certaines cuvettes du fait de leur dégradation et la création de nouvelles cuvettes par l'érosion éolienne. Cette dynamique est accentuée par celle de l'occupation humaine des paysages. Les abords des cuvettes et des vallées sèches constitués souvent d'édifices dunaires sont de plus en plus occupés par les cultures pluviales qui les exposent davantage à l'érosion. En 1984, les édifices dunaires et vallées sèches à culture pluviale représentent 295697 ha alors, qu'en 1996 et 2013, elles occupent respectivement 368153 ha et 423876 ha.

Les systèmes d'information à référence spatiale esquissés permettent d'observer et de suivre la totalité des cuvettes oasiennes. Ce système, conçu en utilisant le langage UML, a permis non seulement d'établir des relations entre les indicateurs de potentiel valorisable et de dégradation mais aussi des informations supplémentaires récoltées sur le terrain (village, marché, zone de fixation biologique et mécanique des dunes). Ils offrent un accès aisé à ces indicateurs grâce à une interface informatique. À travers des requêtes sur cette base de données, les cuvettes à menace très forte nécessitant une intervention urgente pour leur conservation ont été mises en évidence ainsi que les variables explicatives du niveau d'exploitation des cuvettes.

**Mot clés:** cuvette oasienne, indice de forme, potentialités, contraintes, indicateurs, télédétection, monitoring par SIG, Niger.

## GENERAL ABSTRACT

Located in semi-arid zone, oasis basins of east-central Niger are high potential agroecosystems. They represent the last areas where farming is possible throughout the year. These oasis basins have experienced many investments from several NGOs and projects in these recent years. However, the oasis basins are still unknown and / underused by development actors due to their extreme diversity and also due to their huge number.

This thesis aims to:

- Evaluate the performance of three image classification methods in detecting these oasian basins in the Department of Goure. The methods are pixel analysis, textural analysis and object analysis. They are applied to SPOT 5-THX 2.5 m resolution images.
- Characterize the oasis basins shape with two morphological indices (the compactness index of Gravelius and the fractal dimension) as well as their orientations while using the sectors of the wind rose as benchmarks;
- Assess constraints and opportunities related to landscape units of oasis basins and their surroundings for all the oasis basins in the Department of Gouré. Based on the area of these landscape units, spatial indicators of oasis basins characterization were developed.
- Trace the history of the occupation of the oasis basins and their surroundings back to the past. The analyzes are carried out at three periods with Landsat 5-TM images in 1984, SPOT 3 images in 1996 and SPOT 5-THX images in 2013.
- Plan to develop oasis basins degradation monitoring tools in the study area.

Evaluation of the results shows that the approach by object analysis (global precision was 97.12%, Kappa coefficient was equal to 0.97) is more efficient than the textural method (overall precision was 89.61%, Kappa coefficient was equal to 0.90) and the pixel-based approach (overall precision was 80.58%, Kappa coefficient was equal to 0.80). A first original information, namely the number, the position and the surface of all the oasis basins on the study area is provided. The total number of oasis basins in the Department of Gouré is estimated to 10717. The inventory of these resources is a first

compulsory step for the morphological characterization of oasian basins and for the evaluation of their agricultural potential.

The shape index of Gravelius helped highlight circular oasis basins (9%), ovoid (47%), amoeboid (11%), stretched (18%) and very stretched or stretched-amoeboid (16%). The fractal dimension allowed making three classes of basin according to the degree of smoothness of their contours by the wind: very smoothed (39%), smoothed (50%) and moderately smoothed (10%). Herein, the smoothing is interpreted as an indicator of the eolization of the peripheries of the oasis basins. Finally, the determination of the orientation of the main axis of the basins has identified four major areas: EW (23%), NS (21%) NE-SW (22%) and SE-NW (34%). These morphological and orientation analyzes applied for the first time to all the oasis basins of the Department of Gouré offer evidence for understanding the processes of silting the oasis basins in this zone. Analysis of the agricultural potential indicators shows that the oasis basins are multi-purpose spaces, with large skills in arboriculture, market gardens, natron and forestry according to geomorphologic units. In the study area corresponding to the Department of Goure (Niger), the percentage of cropland is low for 45.8% of the oasis basins and high to very high for 3.9%. The percentage of woodland is very high for 61.6% of the oasis basins which represents 51.4% of the area. Oasis basins with natron bare soil and/or shallow or surface groundwater represent 17.6% of oasis basins. For risk indicators of degradation, they show that 3.3% and 0.5% of oasis basins have respectively high and very high risks of getting covered with sand in a medium-term period. Regarding the short-term period, the risk of getting sand dune encroachment is high and very high for 3% and 0.8% of the oasis basins, respectively.

Concerning the recent evolution in this environment, the areas of the oasis basins range from 46783 ha in 1984 to 34553 ha in 2013, transiting to 40831 ha in 1996. Unlike the area of declining cuvettes, their number increased from 1984 (8911) to 2013 (10717). This is partly explained by the different resolutions of the satellite images used, but especially by the fragmentation of certain basins due to their degradation and the creation of new ones by wind erosion. This dynamic is accentuated by the human occupation of the landscapes. The surroundings of the oasis basins and dry valleys often made

up of dune buildings are increasingly occupied by rain-fed crops, which expose them to erosion. In 1984, dunes and dry valleys with rainfed crops represented 295697 ha, whereas in 1996 and 2013 they occupied 368153 ha and 423876 ha respectively.

The geographic information systems have allowed observing and following all the oasis basins. This system, designed using UML, has not only put the relationships between indicators of recoverable potential and degradation and additional information collected in the field (village market, biological fixation zone and Mechanical dunes) but also made easy access to these indicators through a computer interface. Through queries on the database, the very high threaten oasis basins requiring urgent action for their conservation have been identified as well as predictors of the level of exploitation of oasis basins.

**Keyword:** oasian basins, shape index, potential, constraints, remote sensing, indicators, monitoring by GIS, Niger.

## LISTE DES FIGURES

Figure 1- Zone de localisation des cuvettes oasiennes au Niger .....	2
Figure 2- Carte de localisation de la zone d'étude .....	11
<i>Figure 3 - Evolution des cumuls pluviométriques annuels et points de ruptures remarquables suivant le test de Pettitt à Gouré de 1936 à 2013.....</i>	<i>12</i>
Figure 4 -Températures minimales (Tmin) et maximales (Tmax) moyennes mensuelles (en °C) de la station synoptique de Gouré de 1986 à 2012.....	13
Figure 5 - Vitesse moyenne mensuelle de vent de 1984-2014 à Gouré.....	15
Figure 6 - Vue d'une steppe arbustive à Calatropis procerà à Kilakina .....	24
Figure 7 - Vue d'une steppe herbeuse à Aristida mutabilis à Kilakina .....	25
Figure 8 - Vue d'une steppe herbeuse à Pergularia tomentosa à Kilakina ...	25
Figure 9 - Vue d'une steppe arborée à Acacia raddiana à Soubdou.....	26
Figure 10 - Un puits pastoral de la cuvette de Worro.....	28
Figure 11 - Parcelle exploitée en manioc et en dattiers dans la cuvette de Gassafa .....	29
Figure 12 - Vente et chargement des fagots de palmes traitées de palmier doum au marché de Guidiguir .....	31
Figure 13 - Aire centrale d'exploitation du natron de la cuvette Gassafa ....	33
Figure 14 - Schéma synoptique de l'application des trois méthodes de détection des cuvettes par l'analyse pixellaire, texturale et par objet.....	37
Figure 15 - Image de la variance des niveaux de gris de la bande infra-rouge d'une image SPOT 5-THX dans une fenêtre de 17 pixels sur 17.....	43
Figure 16 - Fréquence cumulée des valeurs de variance dans une fenêtre de 0.2 ha du canal proche infrarouge d'image SPOT 5-THX .....	44
Figure 17 - L'effet de l'outil d'analyse « effacer » et de gestion des données « combiner » d'ArcGIS sur une image de SPOT 5-THX d'une partie de la zone d'étude .....	46
Figure 18 - Image composite issue de la combinaison de la bande PIR, image de variance et du NDVI (A), image composite du masquage des cuvettes (B) et inversion du masque (C).....	47
Figure 19 - Résultats de la classification de l'analyse par pixel (A), par texture (B) et par objet (C) d'une partie de la zone d'étude .....	60

Figure 20 - Nombre de cuvettes selon les classes de surface d'après les trois méthodes de détection des cuvettes par l'analyse pixellaire, texturale et par objet.....	62
Figure 21 - Distribution des superficies totales par classes de taille des cuvettes oasiennes de la zone d'étude selon les trois méthodes d'analyse.....	63
Figure 22 - Localisation des cuvettes oasiennes dans le Département de Gouré. ....	64
Figure 23 - Comparaison des formes des cuvettes de Gassafa et d'Iskour restituées par l'analyse d'objet d'image et les formes réelles .....	67
Figure 24 - Comparaison des formes des cuvettes de Balla et de Woro restituées par l'analyse d'objet d'image et les formes réelles .....	68
Figure 25 - Illustration sur une image SPOT 5-THX de cuvettes oasiennes situées dans les secteurs de reliefs du socle associés aux dunes longitudinales .....	81
Figure 26 - Répartition de la taille des cuvettes oasiennes selon l'indice de forme de Gravelius .....	83
Figure 27 - Formes de cuvettes oasiennes obtenues selon l'indice de Gravelius dans le Département de Gouré : A (bande nord), B (bande est).....	84
Figure 28 - Formes de cuvettes oasiennes obtenues selon l'indice de Gravelius dans le Département de Gouré : A (centre-ouest) et B (sud-ouest).....	85
Figure 29 - Superficie totale en hectares des cuvettes oasiennes obtenues suivant les quatre directions de la rose des vents. ....	87
Figure 30 – Répartition du nombre de cuvettes par orientation principales et par classes de tailles.....	89
Figure 31 - Orientation des cuvettes oasiennes au sud du Département de Gouré. ....	90
Figure 32 - Orientation des cuvettes oasiennes au nord du Département de Gouré. ....	90
Figure 33 - Répartition des cuvettes oasiennes selon leur degré de lissage (classes de dimension fractale) et les classes de taille.....	94
Figure 34 - Classes des formes des cuvettes oasiennes obtenues selon la dimension fractale à l'est du Département de Gouré.....	95
Figure 35- Groupement des classes d'indice fractal de cuvettes en fonction de leurs tailles, leurs formes et leurs orientations .....	96

Figure 36 - Répartition du risque d'ensablement des valeurs de dimension fractale de 120 cuvettes en fonction du risque d'ensablement .....	98
Figure 37 - Représentation des couronnes de 0-500 et 500-1000m de large autour d'une cuvette oasienne .....	110
Figure 38 - Photo de la cuvette de Gassafa située au sud-est du Département de Gouré. ....	111
Figure 39 - Profil topographique de la cuvette de Gassafa découpé en unités géodynamiques .....	111
Figure 40 - Structure spatiale de la cuvette Gassafa (unités géodynamiques et leurs limites). D'après interprétation préliminaire image SPOT 5-THX....	112
Figure 41-Carte des unités de paysage des cuvettes oasiennes et de leurs alentours dans le sud-ouest Département de Gouré.....	115
Figure 42 - Carte des unités de paysage des cuvettes oasiennes et de leurs alentours dans le sud-est du Département de Gouré.....	116
Figure 43 - Photo (A) et image SPOT5 (B) de la cuvette oasienne d'Iskeur située au sud du Département de Gouré .....	121
Figure 44 - Évolution de la distribution du nombre des cuvettes de la zone d'étude de 1984 à 2013.....	140
Figure 45 - Évolution de la distribution des superficies des cuvettes de la zone d'étude de 1984 à 2013.....	141
Figure 46 - Évolution des cuvettes oasiennes identifiées par classification d'image sur des images Landsat en 1984 (A), SPOT 3 en 1996 (B) et SPOT 5 en 2013 (C) à l'est du Département de Gouré .....	142
Figure 47 - Évolution des cuvettes oasiennes identifiées par classification d'image sur des images Landsat 5-TM en 1984 (A), SPOT 3 en 1996 (B) et SPOT 5-THX en 2013 (C) à l'ouest du Département de Gouré.....	143
Figure 48 - Passage du modèle UML au modèle physique des données : association de type 1-1 à 1-N (A), association de type plusieurs à plusieurs (B) .....	151
Figure 49 - Exemples de cuvettes mises en cultures (A et B) et non mises en cultures (C et D) photo-identifiées sur image Google Earth d'Avril 2013 dans le Département de Gouré.....	153
Figure 50 - Modèle conceptuel et logique de données .....	157
Figure 51 - Modèle physique de données.....	161

Figure 52 - Répartition spatiale des cuvettes de tailles supérieures à 20ha en fonction de leur niveau d'exploitation agricole et la distance par rapport au goudron.....	163
Figure 53 - Localisation des cuvettes oasiennes à menace immédiate très forte dans le Département de Gouré .....	165

## LISTE DES TABLEAUX

Tableau 1 - Caractéristiques des images SPOT 5-THX de 2.5m utilisées. ..	38
Tableau 2 - Notation d'une matrice de confusion contenant les effectifs de détections correctes (DC), faux positifs (FP), faux négatifs (FN) et rejets corrects (RC) .....	51
Tableau 3 - Matrice de confusion de la classification par analyse pixellaire (unité de base est le pixel) .....	54
Tableau 4 - Matrice de confusion de la classification par analyse texturale (unité de base est le pixel) .....	55
Tableau 5- Matrice de confusion de la classification par analyse par objet (unité de base est le pixel) .....	57
Tableau 6 - Calcul de l'indice critique de succès, de la sensibilité relative et du taux de faux positifs pour les trois méthodes de détection des cuvettes par l'analyse pixellaire, texturale et par objet.....	58
Tableau 7 - Superficie en hectares et nombre de cuvettes oasiennes (>0.2 ha) identifiés dans la zone d'étude .....	61
Tableau 8 – Répartition du nombre et de la superficie des cuvettes oasiennes selon les trois types aquifères .....	63
Tableau 9 - Marge d'erreur pour un niveau de confiance égale à 95 % .....	65
Tableau 10 - Classes de formes de cuvette oasienne suivant les valeurs d'indice de Gravelius.....	74
Tableau 11 - Nombre et superficie minimale, moyenne, maximale et totale des classes de cuvettes oasiennes obtenues suivant l'indice de Gravelius .....	79
Tableau 12 - Nombre et superficies minimale, moyenne, maximale et totale des classes de cuvettes oasiennes obtenues suivant quatre directions de la rose des vents .....	86
Tableau 13 - Nombre et superficie des classes fractales de cuvettes oasiennes .....	92
Tableau 14 - Croisement des classes de forme, d'indice fractal et de risque d'ensablement de 120 cuvettes .....	99
Tableau 15 - Clefs d'interprétation des unités de paysage des cuvettes oasiennes et paysages associés .....	104
Tableau 16 - Eléments de hiérarchisation des classes d'indicateurs spatiaux de caractérisation des cuvettes .....	108

Tableau 17 - Matrice de confusion des unités de paysage associées aux cuvettes en 2013 (unité de base est le pixel) .....	113
Tableau 18 - Typologie et importance des unités paysagères des alentours des cuvettes oasiennes du Département de Gouré .....	114
Tableau 19 - Matrice de confusion des unités de paysage des cuvettes en 2013 (unité de base est le pixel) .....	118
Tableau 20 - Typologie et importance des unités paysagères des alentours des cuvettes oasiennes du Département de Gouré .....	120
Tableau 21 - Nombre et superficie des cuvettes à bas-fond central du Département de Gouré.....	122
Tableau 22 - Typologie et superficies moyenne et totale des cuvettes oasiennes obtenues suivant le pourcentage des superficies cultivables de cuvette (PSCC) .....	125
Tableau 23 - Typologie et superficies moyenne et totale des cuvettes oasiennes obtenues suivant le niveau d'exploitation des surfaces cultivables (NESC) .....	125
Tableau 24 - Typologie et superficies moyenne et totale des cuvettes oasiennes obtenues suivant le pourcentage des surfaces boisées de cuvette (PSBC) .	126
Tableau 25 -Typologie et superficies moyenne et totale des cuvettes oasiennes obtenues suivant le pourcentage des surfaces de dépôt sableux des cuvettes (PSDSC) .....	128
Tableau 26 - Typologie et superficie moyenne et totale des cuvettes oasiennes obtenues suivant le pourcentage de surfaces ravivées de dune dans une zone tampon entre 500 et 1000 m des cuvettes (PSARDVA <sub>500-1000m</sub> ).....	129
Tableau 27 - Typologie et superficie moyenne et totale des cuvettes oasiennes obtenues suivant le pourcentage de surfaces ravivées de dune dans une zone tampon de 0 à 500 m autour des cuvettes(PSRDVA <sub>500m</sub> ).....	129
Tableau 28 - Caractéristiques des images satellitaires utilisées .....	133
Tableau 29 - Calcul de l'indice critique de succès (CSI), de la probabilité de détection (POD) et du taux de faux positifs (TFP).....	135
Tableau 30 - Evolution de la superficie des unités paysagères des alentours des cuvettes oasiennes de la zone d'étude de 1984 à 2013.....	137
Tableau 31 - Evolution de la superficie et du nombre des cuvettes oasiennes de la zone d'étude de 1984 à 2013 .....	139

Tableau 32- Exemple de matrice de confusion.....	156
Tableau 33 - Coefficients logit et rapports de cotes issus de la régression logistique multiple sur les cuvettes mises en cultures ou non en fonction des variables relatives à la distance aux marchés et la présence ou l'absence d'un plan d'eau .....	166
Tableau 34 - Coefficients logit et rapports de cotes issus de la régression logistique simple sur les cuvettes cultivées ou non en fonction de la variable présence ou l'absence d'un plan d'eau .....	167
Tableau 35 - Matrice de confusion contenant les effectifs de vrais négatifs (VN), vrais positifs (VP), faux négatifs (FN) et faux positifs (FP) .....	167

## **LISTE DES SIGLES ET ABREVIATIONS**

**ASTER:** Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer

**bT<sub>CI</sub>:** Basse Terrasse de Cuvette à Cultures Irriguées

**CSI:** Critical Success Index

**D :** Dimension fractale

**DC :** Détections Correctes

**DMN:** Direction de la Météorologie Nationale

**D<sub>SR</sub> :** Édifice Dunaire à Surfaces Ravivées

**FN :** Faux Négatifs

**FP :** Faux Positifs

**GDEM v2 :** Global Digital Elevation Model Version 2

**HRG :** Haute Résolution Géométrique

**HRV :** Haute Résolution Visible

**IGN:** Institut Géographique National

**INS :** Institut national de statistique

**m\_bT\_BF<sub>s</sub> :** Moyenne et Basse Terrasses et Bas fond central de cuvette à plages de sable dénudées;

**m\_bT<sub>SA</sub> :** Moyenne et Basse Terrasses à Savanes Arborées

**m\_bT<sub>SAD</sub> :** Moyenne et Basse Terrasses à Savanes Arborées Dégradées

**m\_bT<sub>SH</sub> :** Moyenne et Basse Terrasses à Savanes Herbeuses

**ME :** Marge d'Erreur

**NDVI:** Normalized Difference Vegetation Index

**NESC :** Niveau d'Exploitation des Surfaces Cultivables de cuvette

**PGRN :** Projet de Gestion des Ressources Naturelles

**PIC:** Projet Interuniversitaire Ciblé

**PIR:** Proche Infrarouge

**PLECO:** Projet de Lutte Contre l'Enablement des Cuvettes Oasiennes dans les Départements de Gouré et de Maïné-soroa

**POD:** Probabilité de Détection

**PSBC :** Pourcentage des Surfaces Boisées de Cuvette

**PSCC :** Pourcentage des Superficies Cultivables de cuvette

**PSDSC :** Pourcentage des Surfaces De Dépôt Sableux des Cuvettes

**PSRDA** : Pourcentage de Surfaces Ravivées de Dune des Alentours d'une cuvette

**RC** : Rejets Corrects

**REC** : Recherche sur l'Ensablement des Cuvettes oasiennes

**RGP**: Recensement Général de la Population

**SAA** : Service d'Arrondissement de l'Agriculture

**SPOT**: Satellite Pour l'Observation de la Terre

**SQL** : Structured Query Language

**TFP**: Taux de Faux Positif

**FN** : Faux Négatifs

**TH**: Très haute résolution

**THX**: Très Haute résolution multi-spectrales

**TM**: Thematic Mapper

**UAM**: Université Abdou Moumouni

**UCL**: Université Catholique de Louvain

**ULg** : Université de Liège

**UML** : Unified Modeling Language

**VN**: Vrai Négatif

**VP** : Vrai Positif

## INTRODUCTION GENERALE

La région sahélienne en général et le Niger en particulier est parsemée de dépressions fermées ou cuvettes oasiennes situées dans des secteurs à interfluves peu accidentés (Tricart et Cailleux, 1970). Ces dépressions sont aussi très fréquentes sur les hamadas au nord-ouest du Sahara.

Les cuvettes sont des dépressions fermées d'allure circulaire à fonds argileux ou argilo-sableux d'origines variées situées dans les régions semi-arides ou arides (George et Verger, 2013). La taille des cuvettes est variable (20 m à 1 km de diamètre). Leur profondeur est aussi variable, de 10 m pour les moins profondes à 20 m pour les plus enfoncées. Leur forme est généralement circulaire, parfois elliptique, mais toujours globuleuse (Tricart et Cailleux, 1970). Certaines sont de vraies dolines, d'autres des cuvettes de déflation. Les bords des cuvettes montrent des formations meubles. Les cuvettes sont des dépressions évasées, aux bords faiblement inclinés, aux fonds très peu accidentés (Tricart et Cailleux, 1970). Capot-Rey (1939) les comparent à des assiettes creuses.

Dans certaines cuvettes, les eaux de ruissellement non salées ou peu salées s'accumulent à l'intérieur (Pouget, 1980). Dans d'autres, l'intérieur fonctionne comme des machines évaporatoires (Coque, 1962). Elles sont alimentées non seulement par des apports superficiels de ruissellement, mais aussi des nappes profondes arrivant jusqu'en surface par des sources ou des suintements (Pouget, 1980). En période sèche, il se forme des efflorescences salines consécutives à l'évaporation des eaux de crue ou des remontées d'eau souterraines plus ou moins salées en saison des pluies (George et Verger, 2013).

Au Niger, les cuvettes se localisent densément dans les régions géologiques du Mounio (Département de Gouré) et du Manga (Départements de Goudoumaria et de Maïné-Soroa) (figure 1). A Gouré, on les trouve surtout dans les communes de Gouré, de Bouné et de Guidiguir. Les unités de paysages associées aux cuvettes à Gouré forment donc les reliefs locaux de commandement et déterminent en grande partie les caractéristiques des unités de paysages de cuvettes.

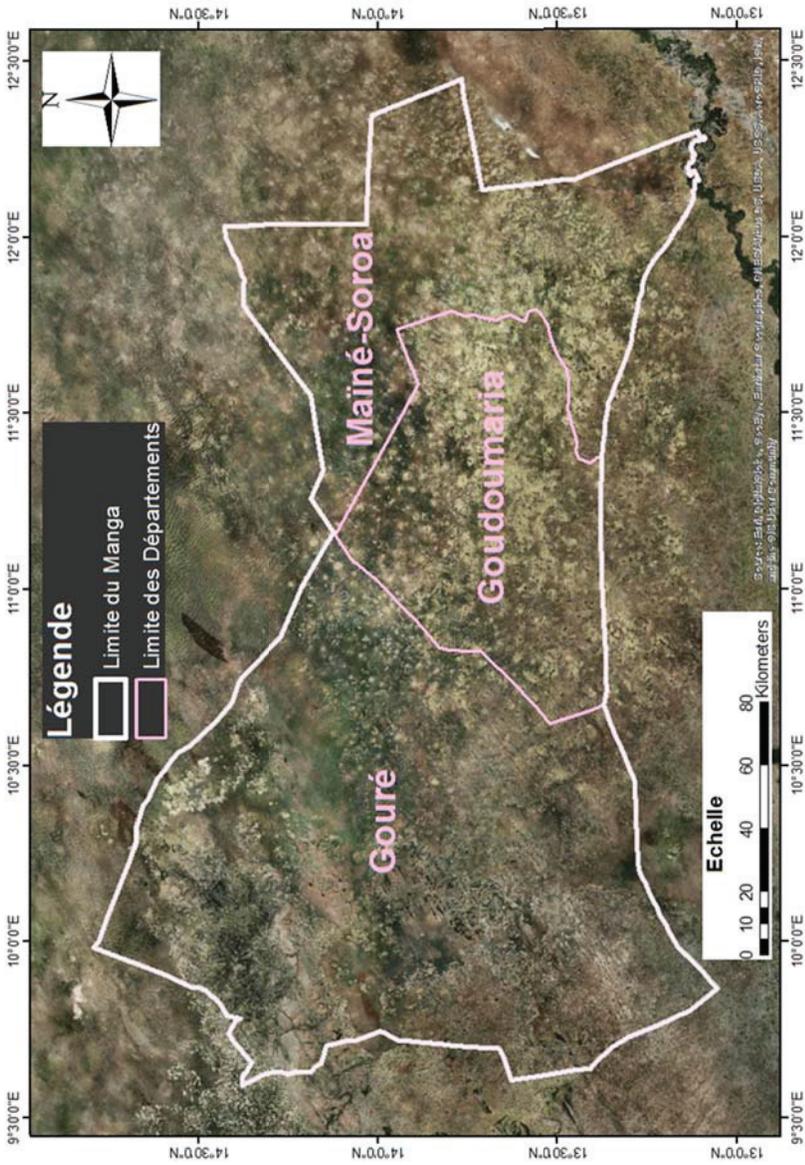


Figure 1 - Zone de localisation des cuvettes oasiennes au Niger

Une première analyse de la région d'après les caractéristiques des unités de paysages associées aux cuvettes à l'échelle 1/200000 a permis de localiser les cuvettes dans cinq types de secteurs géomorphologiques : les secteurs de reliefs résiduels exclusifs, les secteurs de reliefs du socle associés aux dunes, les secteurs des dunes longitudinales ou à orientations E-W, les secteurs des dunes transversales ou à orientations N-S et les secteurs des dunes sans orientation dominante.

Quand on s'intéresse à la synthèse morphologique et à l'échelle du Sahel, les grandes régions naturelles doivent leurs traits morphologiques essentiels aux alternances climatiques (Servant, 1970 ; Maley, 2004). Deux types de formations sédimentaires dominent le Quaternaire (Servant, 1967 ; Zairi, 2008) : les formations lacustres et les formations sableuses éoliennes. Différentes études paléoclimatiques et paléoenvironnementales effectuées au Sahel, de la côte sénégalaise à la cuvette tchadienne ont permis de situer dans le temps les principales phases arides (Servant, 1967 ; Durand et Mathieu, 1980 ; Durand et Lang, 1986 ; Gaultier, 2004).

Parmi les dernières périodes sèches, deux semblent avoir particulièrement marqué de leur empreinte le façonnement des formations sableuses éoliennes au Sahel (Servant et Servant, 1970 ; Durand et Lang, 1986 ; Durand et Mathieu 1980) : la première, l'Antéghazalien aurait sévit antérieurement à 50000 ans ou 65000 ans BP. La seconde, le Kanémien se serait étendue de 20000 à 12000 ans B.P. L'essentiel des formations sableuses éoliennes ont été donc façonnées au cours de ces phases arides du Quaternaire supérieur. En effet, c'est à cette époque que s'érigèrent la plupart des ergs actuels en région sahélienne, en particulier l'erg du Manga dont fait partie la région de Gouré (Greigert et Bernert, 1979). Ainsi, dans le Département de Gouré, la première période aride a mis en place l'Erg ancien. Les périodes arides ultérieures, notamment l'Antéghazalien (antérieur à 35000 ans BP) et le Kanémien (de 20000 à 12000 ans BP) se sont traduites par des remaniements des sables de l'Erg ancien et par la modification du modelé dunaire hérité (Durand et Lang, 1986 ; Gaultier, 2004 ; Zairi, 2008).

L'essentiel des formations lacustres récentes a été mis en place durant l'Holocène (moins de 12000 B.P.) (Servant et Servant, 1970). Des études sur la chronologie calendaire des principales variations climatiques dans le bassin

du lac Tchad ont permis de comprendre l'origine et la genèse de ces formations lacustres holocènes (Maley, 1993 ; 2000 ; Zairi, 2008). Dans cette zone, un premier épisode majeur vers des conditions plus humides est noté entre 9500 et 7500 ans B.P. (Maley, 1993 ; 2000). Le deuxième se situe entre 4000 et 2500 ans B.P. (Durand et Lang, 1986). Cet épisode de faible amplitude est plus court que le premier. Ces épisodes humides ont eu pour conséquence le rehaussement du niveau de la nappe phréatique dans les dépressions interdunaires de la zone (Fontes et Gasse, 1991 ; Fontes *et al.*, 1993). Ainsi, de nombreuses petites et grandes mares peu profondes se sont formées dans ces dépressions topographiques.

À partir de 7000 - 6500 ans B.P., les conditions climatiques se sont progressivement dégradées, avec une influence croissante de la saison sèche et une plus grande instabilité du régime des cours d'eau. L'intensification de l'aridité a entraîné la mise en place de conditions très semblables à la période actuelle.

La paléoclimatologie du bassin du lac Tchad des derniers 1000 ans a connu aussi des conditions relativement stables à l'échelle de l'Holocène. On peut cependant y distinguer des périodes humides (vers 1200, 1380, 1520, 1770 et 1860) et sèches (vers 1280, 1450 et 1830), d'ampleurs parfois plus importantes que celles observées au cours du 20<sup>ème</sup> siècle. Ces périodes d'aridité ont parfois duré plusieurs décennies, comme dans les années 1400 où le lac Tchad est réputé s'être asséché (Maley, 1993).

Les régions du *Mounio et Manga* ont pu facilement collecter les eaux au cours des périodes humides du Quaternaire et permettre ainsi l'extension d'anciens lacs. Néanmoins, ces régions ont connu pendant les époques arides, le déplacement vers le sud des marges désertiques. C'est l'ensemble de ces événements qui a façonné les cuvettes si caractéristiques de toute la partie du *Mounio* et du *Manga* correspondant aux actuels Départements de Gouré, de Goudoumaria et de Maïné-Soroa.

Une recrudescence actuelle de l'activité éolienne, rendue apparente par la remise en mouvement de dépôts éoliens accélère aujourd'hui la dégradation des ressources naturelles du Département de Gouré. Cette dégradation est induite par la péjoration climatique et par la pression anthropique sur les ressources naturelles.

Le Département de Gouré est une zone où les conditions biophysiques sont les plus sévères. Il est reconnu en effet pour ses hautes températures, sa faible pluviométrie annuelle, mais également pour ses vents violents qui soulèvent à leur passage des quantités considérables de poussières minérales (Karimou Barké *et al.*, 2015ab).

La réduction significative de la pluviométrie dans les années 70 et 80 est un des facteurs déterminants de ce phénomène de dégradation des terres, de l'apparition des dunes vives et du remplacement progressif de la végétation arborée par des arbustes (Ozer, 2001). Le suivi de la dynamique de l'ensablement reconstituée par télédétection montre une progression des zones de cultures, des sols dégradés et des zones de remobilisation de sable et une régression des zones de steppe arbustive et des superficies occupées par les cuvettes (Bodart et Ozer, 2009 ; Bodart *et al.*, 2010 ; Hanarou, 2011 ; Kanembou et Karimoune, 2013). L'ensablement et la formation des dunes sur les terres de culture ont pour conséquence immédiate la dégradation surtout physique du sol. Elle se traduit par une modification de la texture du sol qui devient plus grossière suite à l'envahissement par le sable d'où une baisse considérable de la capacité de rétention d'eau par rapport au sol initial (Tidjani *et al.*, 2009a ; Ibrahim *et al.*, 2009). Ces sols deviennent inaptes pour les cultures de contre saison qui demandent des sols de textures plus équilibrées. De plus, la perte en éléments fins auxquels sont liées les matières organiques fait baisser considérablement la fertilité, et donc la production, obligeant les paysans à abandonner les parcelles ou les champs affectés. D'après nos travaux antérieurs (Karimou Barké *et al.*, 2015a), les populations manifestent beaucoup d'inquiétude face à la dégradation de la couverture végétale. Selon elles, cette végétation était autrefois relativement dense et les terres étaient plus productives.

A côté des conditions climatiques, il faut ajouter les pressions humaines sur les ressources naturelles (déboisement excessif, surpâturage, extension des terres de cultures) qui contribuent activement à la dégradation du milieu naturel et à l'augmentation de l'efficacité érosive des vents, conditions favorables à la remise en mouvement des dunes (Kanembou et Karimoune, 2013). En effet, la population est en constante augmentation. En vingt-quatre ans, ses effectifs ont plus que doublé. Cette population, constituée

essentiellement d'agriculteurs et d'éleveurs est estimée à 327818 habitants en 2013 soit une densité d'occupation de 17.8 habitants par km<sup>2</sup> et un taux de croissance annuelle de 3.3 % (INS, 2014). L'agriculture constitue la principale activité économique de la zone, occupant plus de 90 % de sa population (Karimou Barké, 2015a). Elle se pratique sous deux formes : l'agriculture pluviale pratiquée sur les zones dunaires et l'agriculture irriguée dans les cuvettes oasiennes.

Dans cette partie du Niger, il faut noter que le désir de satisfaire les besoins en terres pour l'agriculture pluviale, le pâturage et la quête du bois de chauffe a provoqué une réduction considérable du couvert végétal (Djambouto, 2005 ; Ozer *et al.*, 2010). Ceci a fragilisé les écosystèmes et a provoqué la formation d'accumulations sableuses ou édifices sableux sur les terres agricoles, les voies de communications et autres infrastructures humaines (Kanembou et Karimoune, 2013).

Face à la pression démographique, la demande en terre agricole s'est accompagnée par une extension des cultures au détriment des aires de pâturage avec un renforcement global des pressions sur les maigres ressources naturelles disponibles. Actuellement les dunes, qui étaient jadis destinées à l'exploitation pastorale, sont de plus en plus cultivées sur de grandes étendues pour faire face au déficit céréalier chronique dans la zone (PIC, 2011). Cette situation de mise en culture fragilise la stabilité des dunes et facilite leur mise en mouvement en direction des cuvettes et autres zones pastorales (Tidjani *et al.* 2009a). Aussi, les modes de gestion traditionnelle des terres conduisent à la dégradation de la plupart des terres par érosion éolienne et hydrique (Hanarou, 2011).

Face à cette situation, les populations ont adopté des stratégies d'adaptation en mettant en valeur les cuvettes oasiennes jusque-là peu exploitées (Karimou Barké, 2015a) et qui présentent de nombreuses caractéristiques d'écosystèmes de zones humides. Ces cuvettes constituent un potentiel non négligeable pour le développement et l'intensification de la production agricole dans une zone considérée comme marginale pour l'agriculture (Jahiel, 1998 ; Abdou et Djambouto, 2009). L'agriculture est rendue possible dans les cuvettes par la présence d'une nappe phréatique peu profonde, voire affleurante dans les points bas de plusieurs cuvettes. Les cuvettes sont de ce fait les lieux les plus

favorables à la production agricole. Elles permettent ainsi aux populations de surmonter les difficultés alimentaires qui gangrènent périodiquement la région à cause de mauvaises récoltes. Les cuvettes oasiennes permettent de maintenir en place des populations rurales qui, sans elles, seraient obligées d'émigrer. Les populations sédentaires sont donc fortement dépendantes des cuvettes pour leur subsistance. Jahiel, (1998) rapporte que la production des cuvettes représente 51% des revenus des ménages contre 15% pour les cultures pluviales.

Quelques programmes de recherches et d'actions ont été déjà menés autour des cuvettes dans le Département. Ces recherches ont porté sur l'amélioration des pratiques de gestion des ressources naturelles, la lutte contre leur dégradation, l'inventaire et la caractérisation des formations végétales etc.

Cependant, aucune étude n'a préalablement fait un inventaire exhaustif de ces cuvettes oasiennes. C'est dans ce contexte que le Projet Interuniversitaire Ciblé (PIC) dont la thématique centrale est la *«préservation des cuvettes oasiennes et de leur rôle socio-économique dans le sud-est du Niger»* a engagé des recherches dans cette zone. Mais, avant de chercher des solutions visant à réduire la dégradation des cuvettes oasiennes et à améliorer les conditions de vie dans ces milieux, il faut au préalable les identifier et les caractériser. C'est pourquoi, ce recours à la télédétection est envisagé. En effet, la télédétection offre une vision synoptique et macroscopique de l'ensemble de la zone d'étude qu'il est plus difficile d'obtenir par les moyens traditionnels.

S'il est accepté que les populations tirent l'essentiel de leurs revenus de ces cuvettes oasiennes (Abdou et Djambouto, 2009), on ne connaît malheureusement pas le potentiel de ces cuvettes. Compte tenu de leur grand nombre, les outils traditionnels d'inventaire s'avèrent peu efficaces. C'est pourquoi il est intéressant de tester des outils comme la télédétection afin de mettre au point une méthode automatique de détection et de caractérisation de l'ensemble des cuvettes. Par ailleurs, des efforts doivent être fournis pour sauvegarder la viabilité de ces cuvettes et, cela par des actions adéquates et efficaces. Ceci suppose au préalable une compréhension multidimensionnelle des différents paramètres déterminant la dynamique et la transformation des cuvettes dans la région de Gouré.

Afin de réduire les menaces qui planent autour de ces cuvettes, il devient aussi intéressant de s'interroger sur quelle opérationnalité peuvent offrir les bases de données à référence spatiale pour assurer un monitoring des potentialités des cuvettes ainsi que les contraintes auxquelles elles sont soumises. Les informations obtenues par la télédétection, permettent-elles réellement de mettre en place un outil d'aide à la décision ?

Cette étude de doctorat vise aussi à apporter des connaissances qui permettent d'améliorer la compréhension des processus éoliens autour des cuvettes oasiennes. Elle ambitionne des connaissances nouvelles pour une meilleure compréhension des caractéristiques et dynamiques des cuvettes oasiennes. Enfin, un apport de cette thèse bien attendu sur le plan des interventions de développement, est l'élaboration d'un outil performant qui donne la possibilité d'observer des évolutions d'indicateurs de dégradations et de potentialités des cuvettes oasiennes du Département de Gouré et d'aider à la décision en gestion territoriale des ressources naturelles.

En effet, il n'existe actuellement aucun moyen de suivre par des outils relativement légers, l'évolution de l'utilisation des cuvettes et de leurs niveaux de dégradation. L'objectif général de cette étude est de valoriser les potentialités de la télédétection et des systèmes d'information géographique pour mettre en place un outil de caractérisation et de monitoring de l'ensemble des cuvettes du Département de Gouré. Étant donné la possibilité d'observer l'ensemble de la zone d'étude qu'elle offre, la télédétection peut être d'une grande utilité en facilitant la détection des cuvettes oasiennes. D'autre part, c'est un outil qui permet de mettre à la disposition des utilisateurs potentiels (responsables administratifs et techniques, élus locaux et décideurs) des informations fiables et des mises à jour sur l'état de l'environnement et les ressources naturelles des cuvettes oasiennes.

Pour mettre cet outil en place, il faut d'abord dénombrer, localiser et caractériser les cuvettes oasiennes. L'inventaire des cuvettes oasiennes est un préalable. Il est donc nécessaire de disposer d'une information cartographique fiable et actualisée de l'ensemble des cuvettes oasiennes du Département de Gouré. C'est pourquoi, une cartographie de la zone servant de base pour l'outil de monitoring à élaborer à partir de l'analyse d'images satellitaires de très haute résolution et des cartographies existantes est un objectif premier. La

seconde étape consiste à établir des indicateurs spatiaux des contraintes et potentialités de ces cuvettes. La dernière étape consiste à utiliser une interface d'information pour accéder à ces indicateurs afin de répondre à des questions de gestion, de préservation et conservation des ressources naturelles des cuvettes oasiennes.

Pour répondre à ces objectifs, cette thèse a été subdivisée en six chapitres en plus de l'introduction générale et des conclusions générales et perspectives. Le chapitre un est consacré au contexte de la zone d'étude. Le deuxième identifie l'ensemble des cuvettes oasiennes du Département de Gouré. Dans le troisième, est présentée une caractérisation morphologique des cuvettes oasiennes basée sur des indices de formes et l'orientation des grands axes des cuvettes. Le quatrième traite de l'identification et de la caractérisation des unités de paysage des cuvettes oasiennes et de leurs alentours. Les indicateurs de potentialités et de contraintes des cuvettes oasiennes y sont aussi élaborés. Quant au cinquième chapitre, il traite de l'évolution des unités de paysage des cuvettes oasiennes et de leurs alentours de 1984 à 2013. Enfin, dans le sixième chapitre, un outil de monitoring de l'ensemble des cuvettes est conçu et testé.

## **CHAPITRE I : CONTEXTE DE L'ETUDE**

### **I.1. LOCALISATION GEOGRAPHIQUE**

Situé au centre-est du Niger dans le Département de Gouré (Région de Zinder), la zone d'étude (figure 2) est limitée au nord par le Département de Tesker, au sud par le Département de Magaria et la République Fédérale du Nigeria, à l'est par le Département de Goudoumaria et par le Département de Mirriah à l'ouest. Sa superficie totale est de 11317.2 km<sup>2</sup> soit 66.5 % du Département de Gouré et 7.8 % de la Région de Zinder.

### **I.2. CARACTERISTIQUES DEMOGRAPHIQUES**

Le Département de Gouré connaît une croissance démographique accélérée. La population est passée de 114098 habitants en 1977 (RGP 1977) à 162275 habitants en 1988 (RGP 1988), puis à 219802 habitants en 2001 (RGP/H 2001) et enfin 318861 habitants (RGP/H 2011). Elle était estimée à 327818 habitants en 2014 (INS, 2014). Cette population est composée à 95 % de ruraux, dont 57.6 % d'agriculteurs et 37.4 % d'éleveurs. Six groupes ethniques composent la population du Département. Il s'agit: des Kanouri (Manga et Dagra), des Peulhs, des Haoussas, des Toubous (Téda, Daza, Azza), des Touaregs et des Arabes.

### **I.3. CARACTERISTIQUES CLIMATIQUES**

#### **I.3.1. Régime et évolution des précipitations**

Le climat est de type saharo-sahélien à deux saisons (une saison de pluies ne dépassant guère quatre mois et une longue saison sèche qui dure neuf mois). Les précipitations augmentent progressivement de mai à août pour ensuite diminuer de septembre à octobre (Karimou Barké, 2015a). Il y a une concentration des précipitations pendant les mois de juillet et d'août. Les mois de mai et octobre, avec des cumuls mensuels moyens de 8 mm, ne participent que très légèrement au cumul saisonnier.

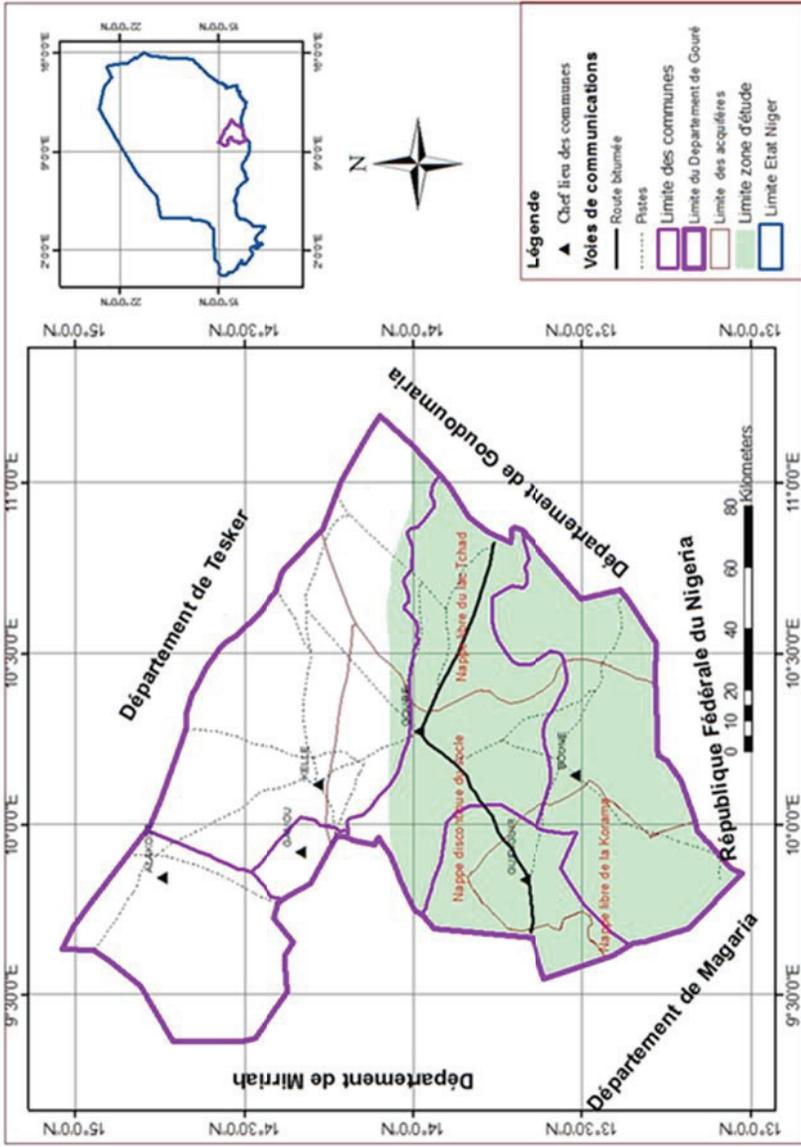


Figure 2- Carte de localisation de la zone d'étude

L'étude de la stabilité de la pluviosité annuelle par l'application du test de Pettitt à la station synoptique de Gouré (1936 à 2013) a permis de mettre en évidence un premier point de rupture hautement significatif en 1969 avec un niveau de probabilité de 0.001 (figure 3). Cette rupture marque le début de la sécheresse dans le sud-est du Niger. L'application du test aux sous-séries (1936-1969 et 1969-2013) détecte une seconde rupture à la hausse significative ( $\alpha = 0.012$ ) en 1989. Ce deuxième point de rupture traduit la fin de la grande sécheresse à Gouré en 1989 et un retour depuis les années 90 à des conditions plus humides dans cette partie du Niger oriental.

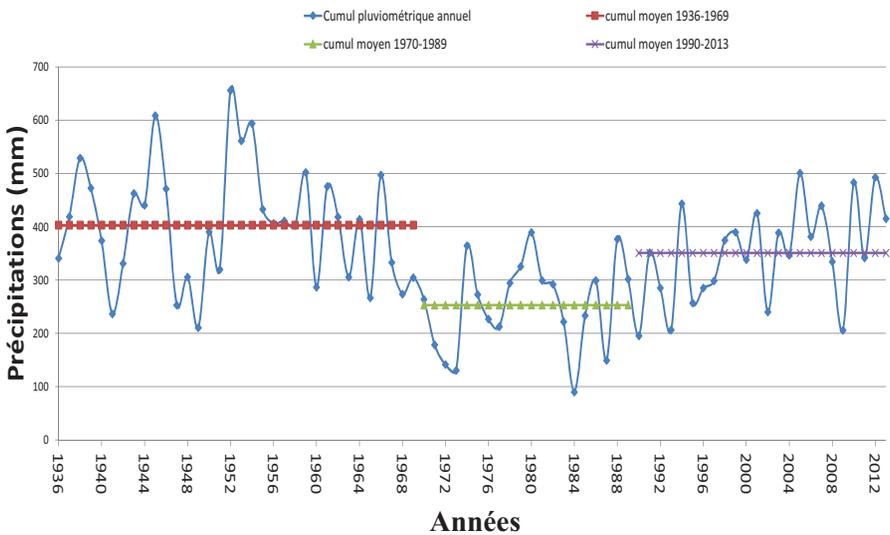


Figure 3 - Evolution des cumuls pluviométriques annuels et points de ruptures remarquables suivant le test de Pettitt à Gouré de 1936 à 2013  
(D'après les données de la DMN (Direction de la Météorologie Nationale))

La figure 3 résume ces ruptures sur les précipitations de Gouré. En effet il ressort de la comparaison des moyennes des sous-séries pluviométriques homogènes à la station synoptique de Gouré que :

- la période de 1936 à 1969 est marquée par une pluviométrie moyenne de 403 mm ;
- la période allant de 1969 à 1989 est caractérisée par un déficit pluviométrique. La moyenne pluviométrique est alors de 253 mm (soit une diminution de 37 % par rapport à la période précédente) ;

- la période de 1989 à 2013 traduit la situation actuelle de l'évolution des précipitations annuelles. Elle est surtout marquée par une augmentation des précipitations moyennes de 98 mm par rapport à la période précédente, soit avec une moyenne annuelle pluviométrique de 351 mm.

### I.3 2. Régime thermique

Les données de températures maximales et minimales mensuelles de la station synoptique de Gouré de 1986 à 2012 (figure 4) montre que le régime thermique est représenté par deux maxima de température. Le principal a une température moyenne égale à 40.9 °C et intervient en fin de saison sèche (avril-mai). Le secondaire a une température moyenne égale à 37.2 °C et s'observe en septembre-octobre, c'est-à-dire vers la fin de la saison des pluies (figure 4). Entre ces deux maxima, on note aussi deux minima de température de 1986 à 2013 : un minimum principal en janvier (température mensuelle moyenne est égale à 13.6 °C) qui coïncide avec l'hiver boréal et un minimum secondaire qui se situe en août (température mensuelle moyenne est égale à 23.6 °C), donc associé aux précipitations dont l'abondance atténue la température.

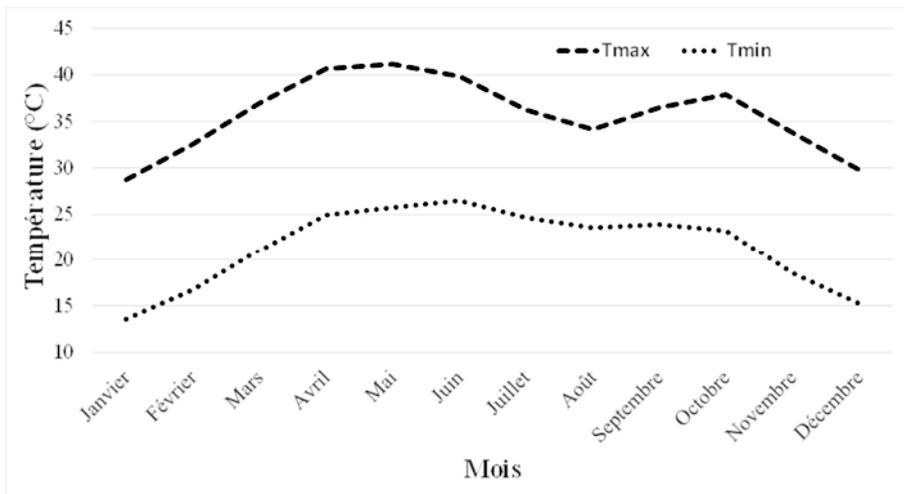


Figure 4 -Températures minimales (Tmin) et maximales (Tmax) moyennes mensuelles (en °C) de la station synoptique de Gouré de 1986 à 2012 (D'après les données de la DMN)

La moyenne des températures minimales est inférieure à 15°C de novembre à février et atteint en moyenne 25°C entre mai et juin.

Les travaux de Karimou Barké *et al.* (2015a) sur la station synoptique Mainé Soroa montrent que les valeurs mensuelles les plus élevées des températures maximales de 1950 à 2002 dépassent les 42 °C pour tous les mois sauf décembre et janvier où elles tournent autour de 38 °C. Les valeurs minimales des températures maximales sont de 26.1 °C entre mars et juillet, 24.4 °C entre septembre et octobre, 21 °C pour le mois d'août et de décembre et à 17.3 °C en janvier.

### **1.3.3. Régime des vents et ses incidences**

Dans le département de Gouré, le régime éolien se caractérise par deux (2) types de vents (Karimoune, 1994 ; Ozer *et al.*, 2004 ; Tidjani, 2008 ; Karimou Barké *et al.*, 2015a) : l'Harmattan (alizé boréal) et la mousson (alizé austral). La fréquence, la vélocité et la forte dynamique de ces deux principaux vents sont à l'origine des formations dunaires.

L'Harmattan souffle en saison sèche de novembre à avril du nord-est au sud-ouest. C'est un vent très sec et chaud à effet très désastreux. Ce vent est nocif car soufflant au moment où le sol est dépourvu de végétation donc sensible à l'érosion éolienne. L'analyse des vitesses mensuelles moyennes de vents mesurés à 10 m du sol de 1984 à 2012 relève des vitesses de vents qui varient durant la saison sèche de 2.3 m/s en octobre à 2.5 m/s en avril avec un pic de 2.8 m/s en janvier (figure 5). En ce qui les directions des vent, en saison sèche à Gouré, les plus fréquentes de 1984 à 2005 (Karimou Barké *et al.*, 2015a) sont d'abord NE (35%) puis E (15 %).

La mousson souffle en saison des pluies de mai à octobre du sud-ouest au nord-est. C'est un vent moins nocif que le premier parce qu'il est chargé d'humidité. Les vitesses moyennes mensuelles à 10 m du sol de 1984 à 2012 sont croissantes depuis le début de la saison des pluies jusqu'à atteindre un paroxysme au mois de juillet (4.3 m/s) et décroissent ensuite jusqu'en septembre (2.4 m/s). Les vents les plus forts sont de courte durée. Ce sont les vents du nord-est qui accompagnent les lignes de grains pendant la saison des pluies.

Pendant la saison des pluies la direction prépondérante est l'WNW à Gouré avec en moyenne une fréquence de 40% (Karimou Barké *et al.*, 2015a). Ensuite l'ouest et le sud-ouest présentent respectivement des secteurs des vents 10.7 % et 6.9%. Tidjani (2008) montre que les vents aux vitesses supérieures à 10 m/s sont enregistrés dans la direction dominante en saison des pluies représentée par le cadran sud-est à est. Ils caractérisent généralement le passage des lignes de grains. Les vents d'ouest à sud-ouest sont typiques des vents de Mousson.

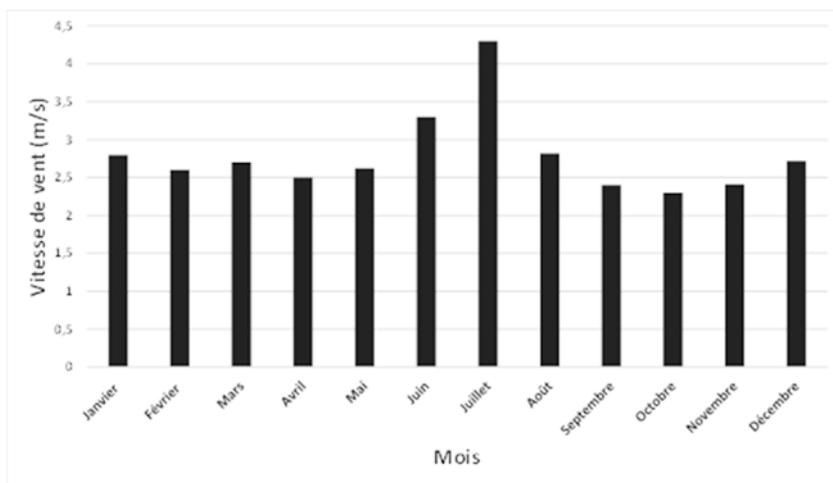


Figure 5 - Vitesse moyenne mensuelle de vent de 1984-2014 à Gouré (D'après les données de la DMN)

Tidjani (2008) montre que les vents aux vitesses supérieures à 10 m/s sont enregistrés dans la direction dominante en saison des pluies représentée par le cadran sud-est à est.

L'analyse des roses de vent annuelles de 1984 à 2005 à Gouré de nos précédents (Karimou Barké *et al.*, 2015a) montre que la direction dominante sur la série est le NE. Ozer *et al.* (2004) confirme que les vents d'E - NE avec 49 % sont les plus prédominants ensuite viennent les vents d'O - SO avec un taux de 21 %.

Aussi, les travaux d'Ozer *et al.* (2004), ont montré que les vents forts ( $\geq 9$  m/s) pouvant déclencher des processus d'érosion soufflent essentiellement

du secteur E-NE (60%) et secondairement (25%) de la direction opposée W-SW.

Karimoune (1994) a observé que les occurrences de vent efficaces (de vitesse supérieure à 3 m/s) ont augmenté de façon assez régulière de 1970-74 avant de connaître une légère baisse en baisse en 1984-89. Les vents calmes représentaient quant à eux 23.3% des relevés en 1970-1974, 16% en 1975-1979, 12.7 % en 1980-1984 et 19.4 % 1985-1989.

L'accroissement de la fréquence des vents efficaces, accélère le vannage et la déflation de particules fines, l'abrasion et la corrasion des roches cohérentes grâce aux particules transportés par le vent.

#### **I.4. CARACTERISTIQUES GEOLOGIQUES**

La région de Gouré correspond à la province géologique identifiée du Mounio sur la carte du Niger.

##### **I.4.1. Socle cristallin**

Le cristallin du Damagaram-Mounio fait la jonction, dans le sens méridien, entre les massifs centraux du Sahara méridional (Hoggar et Aïr) et ceux du nord du Nigeria. Les formations cristallines et cristallophylliennes qui affleurent sont parmi les plus anciennes de l'Afrique l'occidentale (Greigert et Pougnet, 1967).

Le socle du Damagaram-Mounio date du précambrien inférieur et comprend des séries métamorphiques et des formations granitiques (Greigert et Pougnet, 1967). Celles-ci se subdivisent en deux groupes : les granites anciens et les granites jeunes. Les premiers apparaissent sous forme de lambeaux uniquement à l'ouest, dans le Damagaram, tandis que les seconds, les plus répandus, se localisent au nord-ouest, au sud-ouest et à l'est de la ville de Gouré. Il est représenté par :

- des séries anciennes à micaschistes, para-gneiss et quartzites ;
- des granites anciens d'anatexie, calco-alcalins (région de Kellé) ;
- des granites « ultimes » intrusifs, associés à des microgranites, des rhyolithes et des trachytes, qui recourent les précédentes.

## **I.4.2. Formations superficielles du Quaternaire**

Les sables quaternaires ont une grande épaisseur et recouvrent la plus grande partie de la région. Ils sont représentés par les ergs anciens orientés (ergs de Gouré), l'erg du Manga et les ensablements en couverture du massif du Mounio (Karimou Barké, 2005). Ces dunes sont les témoins de phases arides qui, au Quaternaire, ont affecté cette région. Leurs sables ont été par la suite ponctuellement remaniés en terrasses mal individualisées par les écoulements le long des réseaux hydrographiques dégradés.

## **I.5. CARACTERISTIQUES HYDROGEOLOGIQUES**

Les formations aquifères de la zone se subdivisent en deux groupes: l'aquifère de socle du Mounio et les aquifères sédimentaires du Quaternaire (Gaultier, 2004).

### **I.5.1. Aquifère de socle du Mounio**

L'hydrogéologie de la zone de socle du Mounio est caractérisée par un système aquifère discontinu composé des fractures du socle, des altérites et de recouvrements alluviaux argilo-sableux. Les seules ressources en eau de surface se limitent à quelques mares et un réseau hydrographique assez dense à écoulement épisodique. Les ressources en eau souterraine sont les moins bien connues et les plus limitées dans ces secteurs. Selon Ousmane (1978 et 1988), l'aquifère de socle est discontinu et contenu dans les fissures des roches métamorphiques et des granites «anciens» et «jeunes».

### **I.5.2. Aquifères sédimentaires du Quaternaire**

Les aquifères sédimentaires du Quaternaire de la zone d'étude sont liés à deux systèmes, celui du Manga et celui de la Korama. La nappe du Manga est tributaire de la pluviométrie, du retrait du lac Tchad et du régime de la Komadougou (Christian *et al.*, 1998; Sebag *et al.*, 2006 ; Sandao, 2013). La région des Korama est caractérisée par la fossilisation des cours d'eau l'alimentant, la persistance du déficit pluviométrique et la nappe en épuisement du fait des prélèvements massifs au niveau du champ de captage.

Ces aquifères sédimentaires se sont formés dans des dépôts Quaternaires caractérisés par une grande hétérogénéité spatiale et verticale (Gaultier, 2004).

## **I.6. CARACTERISTIQUES GEOMORPHOLOGIQUES**

La géomorphologie étroitement liée aux caractéristiques climatiques et à la nature des roches permet de subdiviser la région en trois grands ensembles (carte topographique de Gouré ND 32 XI au 1/200000) : un secteur d'affleurements rocheux du socle, un secteur d'ergs et de dépressions interdunaires ou cuvettes.

### **I.6.1. Secteur des reliefs résiduels du socle**

Les formes les plus caractéristiques que l'on rencontre dans le Département de Gouré sont des barres allongées, appelées aussi collines, orientées NE-SW et NW-SE (Karimoune et Ozer, 1994). Ce sont des barres filoniennes ou des inselbergs recouverts de blocs rocheux chaotiques et d'éboulis grossiers. Les altitudes sont comprises entre 550 et 650m. Les collines sont localisées surtout aux alentours de la ville de Gouré et présentent une physionomie moins affectée par la dégradation.

### **I.6.2. Secteurs d'ergs et de dépressions inter-dunaires**

#### ***I.6.2.1. Les dunes transversales***

Les dunes transversales sont constituées d'éléments orientés SSE-NNO dont la longueur n'excède pas 5 Km et dont la largeur est généralement inférieure à 0.5 Km. Ces dunes jointives dans le sens NNO-SSE déterminent des couloirs interdunaires plus ou moins longs, plus ou moins profonds. Elles sont émoussées, leurs sommets aplanis. Lorsqu'elles sont suffisamment vigoureuses, on note une dissymétrie entre le versant oriental au vent plus doux et le versant occidental sous le vent en pente forte.

#### ***I.6.2.2. Les dunes longitudinales***

Les dunes longitudinales sont constituées par de longues dunes beaucoup plus vigoureuses que les dunes transversales (Karimoune *et al.*, 1990). Elles sont séparées par des couloirs de déflation et peuvent avoir 8 à 12 Km de long et 0.5 à 1 km de large. Elles sont souvent isolées et s'alignent dans la direction des vents dominants (NE-SO). Elles s'appuient fréquemment sur des éminences rocheuses ou prennent naissance dans les couloirs entre les massifs. Elles ont, contrairement aux dunes transversales, des crêtes assez vives.

Cependant, il arrive que leurs sommets soient modelés par de petites dunes transversales mise en place ultérieurement.

Les dunes longitudinales recoupent souvent le réseau hydrographique et entraînent la création de mares temporaires sur leurs flancs.

### ***1.6.2.3. Cuvettes***

Les cuvettes (localement dénommées *N'Gors* en langue *Kanouri*) sont des dépressions interdunaires de section très variée (amiboïde) et dont la forme générale se rapproche de celle d'un tronc de cône renversé (Ambouta, 2006). La dénivelée oscille entre 10 et 40 m. Dans la dépression, la végétation et les types de sols s'organisent en auréoles concentriques descendant en pente douce vers le centre avec invariablement l'auréole externe constituée essentiellement de palmiers doum denses (*Hyphaene thebaïca*) et la plage centrale nue plus ou moins natronnée, parfois occupée par une mare. Dans les cuvettes, la profondeur de la nappe varie généralement de 0 à 5 m et reste toujours inférieure à celle du plateau sableux environnant.

Les «cuvettes» de la région de Gouré présentent des similitudes biophysiques spécifiques qui font que l'on les perçoit comme appartenant à un même type de paysage. Les caractéristiques visuelles premières qui s'offrent à l'observateur et qui discriminent les paysages de cuvettes dans les paysages locaux sont ici d'abord la concentration d'une végétation dominée par le palmier doum (*Hyphaene thebaïca*), ensuite, leur configuration topographique en creux.

Sur le plan topographique, les unités de paysage des cuvettes forment des dépressions plus ou moins fermées. C'est-à-dire que chaque cuvette se définit par une association de pentes convergentes réparties sur presque toutes les directions (360°). La fermeture de ces dépressions est variable d'une cuvette à l'autre. Elles sont très diversifiées par leurs caractéristiques: taille, forme, matériaux (sols, végétation, eaux), type d'occupation, dynamique, etc. En règle générale, les cuvettes correspondent à des contextes où la productivité hydrologique est insuffisante, pour des causes climatiques et/ou géomorphologiques, à engendrer des débits efficaces à entretenir la continuité des réseaux hydrographiques. A l'inverse, l'efficacité éolienne se renforce

suffisamment pour marquer les paysages par une fréquence spatiale marquée d'ergs fixés.

Les observations de la Région révèlent deux systèmes d'unités de paysage associées aux paysages de cuvettes: les systèmes des reliefs résiduels du socle et les systèmes d'édifices dunaires. Les cuvettes sont générées soit par la combinaison de ces deux différents systèmes ou par la généralisation des systèmes dunaires.

## **I.7. RESSOURCES DES CUVETTES OASIENNES ET DE LEURS ALENTOURS**

Les cuvettes oasiennes du Département de Gouré se distinguent non seulement par leur couverture végétale, leurs formes, mais aussi par leurs caractéristiques édaphiques qui permettent ou non différentes formes d'exploitation. Elles regorgent de ressources appréciables en eau (surface et souterraine), en sols et formations végétales. Parmi ces ressources, le niveau de la nappe phréatique est un des critères le plus discriminant dans la typologie des cuvettes oasiennes. Ainsi sur la base du niveau de la nappe déterminé à partir de la zone centrale la plus basse, Jahiel (1998) puis Ambouta (2006), distinguent trois (3) grands types de cuvettes : les cuvettes à eau affleurante (nappe inférieure à 1 m de profondeur), les cuvettes à eau intermédiaire (profondeur de nappe entre 1 et 3 m) et les cuvettes à eau profonde (profondeur de nappe supérieure à 3 m).

Dans les cuvettes à eau profonde, les auréoles de sols et de végétation sont agencées en deux couronnes, souvent segmentées, autour d'une plage centrale avec, de l'extérieur vers l'intérieur :

- une première auréole dite extérieure ou couronne arborée dominée par des palmiers doums, dont parfois des pans entiers sont cultivés en mil ;
- une deuxième auréole, boisée et parfois localement exploitée en jardinage, à nappe profonde de plus de 4 m (Ambouta, 2006).

Les cuvettes à eau intermédiaire ont une nappe phréatique située en moyenne entre 2 et 3 m de profondeur. Les auréoles de sols et de végétation sont aussi agencées en deux couronnes autour d'une plage centrale avec, de l'extérieur vers l'intérieur :

- la première auréole dite extérieure ou couronne arborée dominée par des palmiers doums, à nappe profonde de plus de 3-4 m ;
- la deuxième auréole où est pratiquée une polyculture irriguée, à nappe phréatique comprise entre 2 et 4 m ;
- la plage centrale, natronnée et nue, à un niveau de nappe fluctuant entre 1 et 3 m.

Les cuvettes à eau affleurante se caractérisent par la présence d'un plan d'eau de surface dans la partie la plus basse. La richesse des sols et la proximité de la nappe permettent aux agriculteurs de développer une agriculture de rente. Suivant la topo-séquence de la cuvette, on différencie de l'extérieur vers l'intérieur :

- la première auréole dite extérieure ou couronne de palmiers doums, à nappe profonde de plus de 2 m ;
- la deuxième intermédiaire à spéculation agricole et à niveau de nappe compris entre 1 et 2 m de profondeur ;
- la troisième occupée par des plantes halophiles, à nappe proche de la surface (40 à 100 cm) ;
- la plage centrale occupée par une mare permanente ou non. Quand elle est saisonnière des croûtes salines (natron) s'y forment en saison sèche, la nappe devenant alors sub-affleurante.

En plus de leurs mares, les cuvettes à eau affleurante se distinguent donc des autres par la présence d'une troisième auréole caractéristique de végétation composée de roseaux et apparaissant de manière diffuse au sein de la deuxième auréole ou en mince liseré aval (Ambouta, 2006 ; PLECO, 2006).

### **I.7.1. Caractéristiques morpho-pédologiques**

#### ***I.7.1.1. Les sols des alentours de cuvettes***

Dans les secteurs de reliefs résiduels du socle, on rencontre des sols minéraux bruts. Ils sont peu différenciés ne contiennent que des traces de matières organiques dans les 20 premiers centimètres. Les matières minérales peuvent avoir subi une dégradation et une fragmentation mécaniques plus ou moins poussées, mais l'altération chimique reste faible. Ils s'observent sur des roches ou des formations superficielles qui n'ont pas encore ou peu subi l'évolution pédologique. Ils sont divisés en deux sous-classes qui sont :

- les sols minéraux bruts d'érosion dits lithosols lorsqu'ils se sont formés sur des matériaux rocheux durs ou régosols, lorsque formés sur matériaux peu cohérents;
- les sols minéraux bruts d'apports éoliens sur formation sableuse.

Les sols minéraux bruts sont impropres aux cultures en raison de l'inexistence d'un horizon meuble assez épais. Ils ont plutôt une vocation pastorale (Karimou Barké M., 2005). Les sols minéraux bruts se rencontrent dans le Mounio, le Koutous et à l'extrême nord.

Dans les secteurs d'ergs, deux types de sols se rencontrent. Il s'agit des sols subarides tropicaux et des sols peu évolués. Les sols subarides tropicaux ont un complexe saturé et évoluent sous un pédoclimat à température élevée pendant la saison des pluies. Ce groupe est surtout caractérisé par une accumulation dans le profil d'une matière organique très évoluée qui diminue avec la profondeur. Les sols subarides tropicaux sont représentés par deux sous-groupes définis par Gavaud et Bocquier (1964), comme suit :

- les sols subarides bruns : ils ont un profil homogène de faible épaisseur (moins de 150 cm), de couleur foncée sans horizons nettement différenciés. Ils se développent sur matériau relativement argileux ;
- les sols subarides brun-rouge : ils possèdent en surface un horizon humifère épais d'au moins 50 cm, de couleur brune, assez structuré. Les horizons profonds sont d'une couleur rousse caractéristique, jamais durcis. Les sols subarides brun-rouge se sont formés généralement sur sables éoliens.

Les sols subarides, notamment ceux brun-rouge ont une fertilité basse et sont surtout réservés au pâturage compte tenu de leur position septentrionale (faible pluviosité). On y trouve cependant de nombreux champs de cultures pluviales. Ces sols s'appauvrissent rapidement du fait de leur sensibilité à l'érosion (hydrique et éolienne).

Les sols peu évolués sont à profils plus différenciés que les sols minéraux bruts et sont caractérisés essentiellement par la faible altération du matériel minéral et dans la majorité des cas la faible teneur en matière organique du profil (Duchaufour *et al.*, 1994). On distingue la sous classe des sols peu évolués d'origine non climatique scindée en deux groupes qui sont :

- les sols peu évolués d'apport bien drainés (cordons et ergs, sables alluviaux) intergrades vers les sols subarides ;
- les sols peu évolués d'érosion, très fréquents sur les matériaux sédimentaires argileux.

Les sols peu évolués d'apport éolien sont pauvres en matières organiques et en éléments chimiques. Ils sont très sensibles à l'érosion éolienne et moins à l'érosion hydrique. S'ils sont de texture sableuse, ils ont l'inconvénient d'être perméables et très pauvres en matières organiques. Les sols peu évolués d'apport éolien intergrades vers les sols subarides occupent la quasi-totalité de la bande sud du Département de Guidiguir à la limite Est de Gouré. Ces sols sont peu propices aux cultures vivrières (mil, sorgho).

#### ***1.7.1.2. Les sols des cuvettes***

Les caractéristiques pédologiques des cuvettes oasiennes varient suivant les topo-séquences. En règle générale, leur gradient de salinité croît de l'extérieur de la cuvette vers l'intérieur. La distribution théorique des sols est donc organisée en auréoles concentriques de moins en moins salées au fur et à mesure que l'on s'éloigne de la partie centrale de la cuvette. La couronne externe de la cuvette présente des sols peu évolués pour les cuvettes à eau affleurante ou intermédiaire et des sols bruns subarides marmorisés pour les cuvettes à eau profonde (Ambouta, 2006).

Au niveau de la deuxième couronne, l'on rencontre les sols plus riches ou plus salés. Ce sont des sols salés à hydromorphie de profondeur.

La troisième couronne des cuvettes à eau affleurante présente des sols salés à hydromorphie totale. Ils connaissent un accroissement de la salinité dans les zones exploitées sans drainage. La partie centrale de la cuvette présente un sol salé (natronné) à hydromorphie permanente. Ce sont des sols aptes à la production du natron.

#### **1.7.2. Caractéristiques de la couverture végétale**

##### ***1.7.2.1. La végétation des alentours des cuvettes***

La végétation de Gouré est principalement constituée d'une steppe arbustive claire dans le nord et d'une steppe plus diffuse et arborée dans le

sud. Ainsi, en fonction de la géomorphologie du terrain le gradient de végétation se caractérise par des espèces différentes.

Sur les reliefs résiduels du socle, la végétation se rencontre particulièrement sur les jeunes granites du Mounio. Les associations végétales arborées sont dominées par *Sclerocarya birrea* et *Commiphora africana*. Les associations végétales comprennent *Grewia spp.*, *Lannea fruticosa* et, sur les zones sablonneuses, le *Guiera senegalensis*. Le tapis herbacé est constitué aussi bien de plantes annuelles (*Aristida spp.*, *Cenchrus biflorus*) que de plantes pérennes telle le *Cymbopogon gayanus* (Ambouta 2006 ; PLECO, 2006).

Sur les édifices dunaires, la végétation est composée de trois types d'associations végétales. Les associations végétales arborées se rencontrent principalement dans le sud. Elles sont dominées par *Acacia raddiana* associé à *Sclerocarya birrea* et très localement sur fond argilo-sableux au *Balanites aegyptiaca*. Ensuite, on note la végétation des sols dunaires dominée par des associations végétales arbustives constituées de *Leptadenia pyrotechnica* et *Calotropis procera* avec un tapis herbacé continu ou discontinu. La dégradation du milieu conduit à la disparition du *Leptadenia pyrotechnica* et laisse la place à *Calotropis procera* (figure 6). Il est difficile néanmoins d'affirmer entre ces deux arbustes, lequel est le plus dominant. Cependant, on peut constater que toute diminution de la densité de *Leptadenia pyrotechnica* semble s'accompagner d'une augmentation de celle de *Calotropis procera*. Ceci est surtout vrai sur les plaines dunaires.



Figure 6 - Vue d'une steppe arbustive à *Calotropis procera* à Kilakina

Enfin on observe les associations végétales d'espèces annuelles et/ou pérennes. La dégradation de la strate arbustive conduit à une steppe herbeuse se rapprochant parfois de la prairie. La steppe herbeuse présente souvent trois faciès : une steppe herbeuse à *Cenchrus biflorus* peu étendue et localisée, une steppe herbeuse à *Aristida mutabilis* (figure 7) et une steppe herbeuse à *Pergularia tomentosa* (figure 8).



Figure 7 - Vue d'une steppe herbeuse à *Aristida mutabilis* à Kilakina



Figure 8 - Vue d'une steppe herbeuse à *Pergularia tomentosa* à Kilakina

Dans les vallées sèches, la végétation se répartit en fonction des conditions d'humidité du sol et du degré d'artificialisation. Mais, elle est aussi variable dans sa composition floristique du nord au sud. Ainsi, les vallées du sud présentent des formations plus ou moins denses d'épineux où domine l'espèce *Acacia senegal* en association avec *Acacia raddiana* et *Acacia seyal* sur un

fond de tapis herbacé à *Cenchrus biflorus* (figure 9). Au nord, les vallées comportent une végétation à richesse spécifique réduite composée essentiellement de *Cymbopogon gayanus* avec les pieds isolés de *Salvadora perica*. Les vallées sèches semblent présenter très peu d'érosion.



Figure 9 - Vue d'une steppe arborée à *Acacia raddiana* à Soubdou

#### **I.7.2.2. La végétation des cuvettes**

La végétation des cuvettes répond aux variations du gradient pluviométrique décroissant sud-nord, mais elle est aussi fonction des conditions du site, notamment de l'intensité et du mode de pression anthropique. Cependant, d'une manière générale, la végétation suit un arrangement d'espèces végétales de l'extérieur vers l'intérieur de la cuvette. Ainsi on distingue principalement trois ceintures :

- la ceinture externe est formée presque exclusivement de *Hyphaene thebaïca* avec un recouvrement dépassant parfois 80 % pour une densité de plus de 500 pieds à l'hectare (PLECO, 2006). Le tapis herbacé y est presque absent, comprenant essentiellement les espèces d'ombres pérennes. On trouve en sa périphérie interne des dattiers. Sur les sols bruns subarides marmorisés, on observe une couverture lâche de palmiers doums renforcée par des *Acacia spp.*
- la ceinture médiane est occupée par une formation végétale variée et est aussi exploitée en polycultures irriguées (cultures céréalières,

maraîchères et fruitières). Elle peut comporter des herbacés hydrophiles tolérant des sols alcalins.

- la ceinture intérieure à sels et natron, avec un plan d'eau saumâtre dans le cas des cuvettes humides ou à eau affleurante. Elle est occupée par une végétation semi-aquatique constituée de roseaux ou est localement exploitée par des cultures de canne à sucre, patates et céréales.

## **I.8. GESTION DES CUVETTES OASIENNES ET DE LEURS ALENTOURS**

Les cuvettes oasiennes concentrent l'essentiel des ressources naturelles exploitées par les populations locales et constituent des îlots permettant de les fixer dans un territoire vaste et austère. Cependant les cuvettes semblent sous-exploitées. Les productions agricoles restent faibles au regard des potentialités. L'agriculture de subsistance généralement pratiquée dans ces régions demeure de type extensif ; les intrants sont faibles et la mécanisation très limitée. Le mode d'exploitation semble être d'ailleurs un second critère pertinent après celui du niveau de la nappe phréatique permettant d'établir une classification des cuvettes (Ambouta, 2006).

### **I.8.1. Forme d'exploitation des cuvettes oasiennes et de leurs alentours**

Le Département de Gouré regorge de nombreuses cuvettes dont les potentialités ne sont pas totalement valorisées. Malgré le caractère aléatoire des pluies, ces cuvettes constituent des zones exploitées sous diverses formes durant toute l'année par les populations pour lutter contre la pauvreté et l'insécurité alimentaire. On note plusieurs formes d'exploitation des ressources d'une cuvette oasienne à une autre et dans une même cuvette selon l'unité de paysage sur la laquelle on se situe.

#### ***I.8.1.1. L'exploitation pastorale***

Certaines cuvettes, malgré leur potentiel productif, ont surtout une vocation pastorale car elles servent d'une part, à l'abreuvement des animaux du village et ceux de passage (figure 10) et d'autre part, à l'alimentation en eau du village grâce à des puits traditionnels et modernes. Ces puits constituent les principaux points d'eau pour l'alimentation des villages. Les

cuvettes pastorales sont aussi d'importantes sources de fourrage vert durant toute l'année. On distingue trois types de ressources fourragères dans le Département de Gouré : le pâturage arboré et arbustif, le pâturage herbacé et les sous-produits de l'agriculture (PGRN, 1997).

Les cuvettes utilisées pour le pastoralisme tendent à se dégrader du fait de la concentration des animaux et aussi de l'abattage abusif des arbres (Karimou Barké, 2005).

Ces cuvettes renferment de nombreux puisards pastoraux et offrent une grande capacité d'accueil des animaux. Certaines ont la capacité d'abreuver des centaines d'animaux par jour du fait de la faible profondeur de la nappe phréatique et de leur débit appréciable en eau. Les cuvettes oasiennes de cette zone ont une bonne aptitude pastorale, d'où leur utilisation intense aussi bien par les troupeaux nomades ou semi-nomades que par le petit bétail sédentaire villageois, contribuant ainsi fortement à leur ensablement du fait de la fragilisation poussée des sols.



*Figure 10 - Un puits pastoral de la cuvette de Worro*

Les édifices dunaires aussi sont utilisés pour le pastoralisme (Karimou Barke, 2005). Ces unités tendent à se dégrader du fait de la concentration des animaux et aussi de l'abattage abusif des arbres. Le tapis herbacé relativement dense pendant l'hivernage est rapidement consommé ou piétiné en saison

sèche mettant à nu le sol qui se trouve soumis à la déflation et à l'érosion hydrique pendant les premières pluies de l'hivernage.

### ***1.8.1.2. L'exploitation agricole***

L'exploitation agricole dans les cuvettes est assez diversifiée et concerne les cultures suivantes : la canne à sucre, l'oignon, le manioc, la patate douce, le maïs, la carotte, le piment et des arbres fruitiers notamment le bananier, le papayer, le manguier, le dattier (figure 11). Ces produits sont autoconsommés en grande partie, mais aussi vendus sur les marchés locaux. Notons que les volumes de certains produits comme le manioc, les dattes dépassent largement les besoins de l'autoconsommation des producteurs (Boukar Krou, 2016). Mais l'absence d'un bon conditionnement rend difficile leur stockage ou leur transformation, et les surplus sont donc commercialisés généralement vers le Nigeria avec des pertes importantes soit au cours de l'écoulement, soit sur les marchés.



*Figure 11 - Parcelle exploitée en manioc et en dattiers dans la cuvette de Gassafa*

Les parcelles exploitées sont délimitées par des haies de branches mortes d'épineux. Ces barrières empêchent aux animaux de divaguer dans les exploitations mais limitent aussi l'ensablement par les apports éoliens. En jachère pendant la saison des pluies, les cuvettes sont intensément cultivées

sous irrigation en saison fraîche et sèche car la nappe phréatique se situe entre 2 et 4 m. L'irrigation se fait généralement par puisage manuel dans des puisards approfondis au fur et à mesure de la baisse de la nappe piézométrique. Ces puits sommaires ont une durée de vie très courte car creusés dans un matériau sableux et bouillant dès qu'il est en contact avec l'eau si bien qu'ils s'effondrent très rapidement. Certains agriculteurs utilisent des puits modernes foncés avec l'aide des projets et des ONGs. L'arboriculture est bien développée dans certaines cuvettes avec comme culture principale les dattiers associés aux bananiers, citronniers, goyaviers et papayers.

Aujourd'hui, on assiste de plus en plus en une mise en valeur des sols dunaires (sommets de dune et flanc de dune) en cultures pluviales aux environs des cuvettes. Cette pratique d'exploitation agricole des milieux dunaires contribue à la mobilisation éolienne des sédiments. A l'approche de la saison de pluies, au cours des travaux de préparation de sol, certains champs subissent un défrichage intégral sans tenir compte de la capacité de régénération naturelle des ligneux. Cette pratique expose davantage le sol aux vents érosifs du début de la saison hivernale avant l'installation du tapis herbacé. A cela s'ajoute le défrichage de nouveaux champs, en particulier sur les flancs de dunes, du fait de la sédentarisation des populations nomades et de la croissance démographique rapide. Enfin, il est important également de noter le ramassage des résidus de cultures après les récoltes. Cette pratique réduit la rugosité aérodynamique de la surface du sol et favorise ainsi la mobilisation éolienne des sédiments.

### ***1.8.1.3. L'exploitation forestière***

Les cuvettes présentent un peuplement abondant de palmiers doum qui offre un stock important de rachis permettant des opérations de fixation des dunes. Les feuilles et fruits d'*Hyphaene thebaica* alimentent des circuits de commercialisation très actifs à partir de ces zones de production (figure 12). D'importantes quantités de ces produits sont stockées et vendues à travers les différents marchés locaux. La filière de ressources du palmier doum comporte trois principales activités de base (Harouna, 2005) :

- la production, dont les acteurs sont les coupeurs-vendeurs de palmes et les cueilleurs de fruits et pétioles ;

- la transformation assurée essentiellement par les artisans ;
- la commercialisation des produits et sous-produits du palmier doum, dont les agents sont les collecteurs, les grossistes, les détaillants etc.

L'exploitation forestière des cuvettes concerne aussi la coupe de bois de chauffe et de service mais aussi le prélèvement des rachis du palmier doum comme matériel de construction des palissades antiérosives (fixation mécanique des dunes). Ce prélèvement ne semble pas avoir d'effet négatif sur la pérennité des formations car seuls les rachis morts sont prélevés.



Figure 12 - Vente et chargement des fagots de palmes traitées de palmier doum au marché de Guidiguir

Notons que, sur les sols dunaires, le *Leptadenia pyrotechnica* est utilisé pour la fixation mécanique des dunes. Actuellement, le prélèvement de *Leptadenia pyrotechnica* n'est soumis à aucune réglementation ni à aucun contrôle. Les prélèvements n'ont cependant pas d'effet négatif sensible car l'espèce rejette, quel que soit le niveau de coupe et même après la mort de la tige principale (Boukari, 2013). Cependant, il est constaté que le type de coupe

peut avoir un impact sur la densité de la régénération. En effet la coupe au ras du sol permet une régénération plus dense, plus régulière et une croissance plus rapide, contrairement à la coupe partielle qui conduit à une régénération faible et une croissance assez lente.

#### ***1.8.1.4. L'exploitation du natron***

En plus des exploitations agropastorales, les cuvettes offrent des possibilités d'extraire le natron (figure 13). L'exploitation du natron se fait exclusivement dans les cuvettes à eau affleurante ou intermédiaire. C'est une activité qui mobilise un nombre important d'actifs dans la population. L'exploitation du natron constitue une source de revenus principalement pour les chefs traditionnels cantonaux, car selon le droit foncier coutumier, le natron est le plus souvent propriété exclusive de la chefferie traditionnelle. De ce fait, il génère une richesse inégalement répartie au sein de la population. Cependant, le ramassage du natron à l'intérieur des cuvettes constitue une source de revenus pour les populations recrutées comme main d'œuvre. L'exploitation du sel est assurée généralement par les femmes et le sel est écoulé sur les marchés locaux et parfois transporté jusqu'au Nigeria par des caravaniers ou par camions. Trois types de natron sont généralement exploités : le natron rouge (moins abondant, mais plus apprécié et logiquement plus coté), le natron blanc (de seconde qualité et très largement répandu) et le natron en poudre (de couleur noirâtre, de moindre qualité et que l'on rencontre dans toutes les cuvettes productrices de natron). La formation des croûtes de sel est plus accentuée durant la période de forte chaleur des mois d'avril et mai où les remontées capillaires du sol sont très activées par l'évaporation (Waziri, 2000).



Figure 13 - Aire centrale d'exploitation du natron de la cuvette Gassafa

### **I.8.2. Intensité d'exploitation des cuvettes et types de dégradation**

L'exploitation agricole de certaines cuvettes devient de plus en plus difficile à cause de la baisse du niveau de la nappe phréatique. Cette baisse qui s'expliquerait par les déficits pluviométriques enregistrés au cours de ces dernières décennies, a entraîné une réduction des rendements au niveau des cuvettes (Ozer *et al.*, 2009 ; Karimou Barké *et al.*, 2015ab). Certaines cuvettes agricoles sont devenues des cuvettes pastorales dès que le niveau de la nappe a commencé à baisser faute de moyens d'exhaure et infrastructures modernes tels que les pompes, les forages, les puits modernes. En effet, seules quelques cuvettes de la zone ont bénéficié de puits modernes équipés de pompes à motricité humaine, fruits des interventions des projets, ONG ou de l'Etat (Djambouto, 2005). Malheureusement, ces investissements ne sont souvent pas accompagnés d'encadrements techniques et démonstrations (utilisation d'engrais, semences améliorées). C'est pourquoi le système d'exploitation des cuvettes reste traditionnel et utilise peu d'engrais et autres produits phytosanitaires.

Cependant, dans quelques cas, l'irrigation excessive pratiquée tout au long de l'année a des conséquences dramatiques sur les sols. En effet, lorsque l'eau d'irrigation n'est pas drainée, elle stagne dans les parcelles, et s'évapore lentement, laissant en dépôt les sels dissous qu'elle contient. Cet excès de sels stérilise progressivement les superficies cultivables dans certaines cuvettes qui doivent alors être abandonnées (Malam, 2010).

Mais d'autres formes d'exploitations contribuent aussi à dégrader les cuvettes. Il s'agit notamment de l'installation des cultures pluviales autour des cuvettes et la coupe abusive des arbres. Généralement, le niveau d'exploitation des ressources naturelles constitue un bon indicateur pour apprécier le niveau de dégradation dans les cuvettes. L'exploitation abusive des ressources naturelles (coupe du bois, extension des défrichements, surpâturage) constitue une des principales causes de la transformation de ces écosystèmes (Ozer et Ozer, 2005 ; Ozer *et al.*, 2010). Ces pratiques renforcent l'efficacité de l'érosion éolienne et donc le processus d'ensablement, l'un des problèmes fondamentaux auxquels les cuvettes sont confrontées. L'ensablement se traduit généralement par la restriction des aires exploitables par ensevelissement, voire leur dégradation totale.

Mais l'un des phénomènes les plus destructeurs sont les feux de brousse d'origine le plus souvent anthropique qui détruisent la végétation à l'intérieur et autour des cuvettes. Les feux de brousse entraînent la perte immédiate de la biomasse herbacée et ligneuse avec comme conséquences, les risques d'érosion (hydrique et éolienne), l'insuffisance des pâturages pour l'élevage, la destruction des animaux (sauvages et domestiques), des récoltes et parfois même des pertes en vie humaine (Abdou, 2013).

Plus de la moitié de la superficie du Département de Gouré est classée en zone pastorale (Issa *et al.*, 2009). Les populations et les animaux utilisent les puits localisés dans les cuvettes pour satisfaire leurs besoins en eau. Ceci signifie une cohabitation forcée entre les animaux et les parcelles de cultures. Il faut donc des investissements pour protéger les exploitations agricoles du bétail. En effet, la divagation des animaux constitue une contrainte contre laquelle les paysans clôturent les parcelles à l'aide des branchages d'épineux. Cette divagation des animaux est source de conflits fréquents entre les éleveurs et les agriculteurs.

Il faut aussi noter que les cuvettes à eau affleurante ou à eau intermédiaire sont souvent inondées en cas de pluie abondante (Ambouta, 2006 ; PLECO, 2006). Ces inondations provoquent l'éboulement et le comblement des puisards par des coulées de sables transportées ainsi que des pertes agricoles fréquentes par asphyxie des plantes cultivées.

Bien que les cuvettes oasiennes du Département de Gouré subissent une forte pression anthropique associée à une menace d'ensablement qui entraîne leur disparition progressive, elles constituent une source de revenus importante pour les agriculteurs de la région (Abdou et Adj, 2009 ; Abdou et Djambouto, 2009). C'est pourquoi, de nombreux programmes de recherches et d'actions ont été menés autour des cuvettes oasiennes. La plupart porte sur l'amélioration des pratiques de gestion de ces cuvettes, la lutte contre leur dégradation, l'inventaire et la caractérisation des espèces végétales qui se développent à l'intérieur et aux alentours et l'évaluation des ressources (Tychon *et al.*, 2009). Mais aucune étude n'a préalablement fait un inventaire exhaustif de ces dépressions fermées. Le chapitre suivant est consacré à l'identification par télédétection de l'ensemble des cuvettes oasiennes du Département de Gouré.

## **CHAPITRE II. DETECTION DES CUVETTES OASIENNES DU CENTRE-EST DU NIGER PAR CLASSIFICATION D'IMAGES SATELLITE SPOT 5-THX**

### **Introduction**

Compte tenu d'une part, de l'importance des cuvettes oasiennes du Département de Gouré sur le plan de vue économique, social et alimentaire pour les populations (Jahiel, 1998 ; Abdou et Adji, 2009 ; Abdou et Djambouto, 2009) et d'autre part des menaces d'ensablement par les dunes vives qui planent autour d'elles (Tidjani *et al.*, 2009a), des mesures sont en train d'être prises pour leur préservation et la sécurisation de leur rôle socio-économique. Pour bien préserver les cuvettes, il faudrait au préalable bien les connaître afin de pouvoir mener des actions bien pensées. Compte tenu de leur grand nombre et de leur diversité, la télédétection, grâce à sa vision synoptique, est un outil pertinent pour localiser et inventorier ces cuvettes oasiennes.

Un traitement courant en télédétection consiste à réaliser une classification ou un partitionnement des images. Chaque partition ou classe d'une image est souvent supposée correspondre à un seul type d'«objet». La couleur, la texture, la forme, le contexte sont utilisés comme critères de classification.

L'objectif de ce chapitre est d'établir une évaluation comparative entre trois méthodes d'identification des cuvettes afin de retenir la plus performante. Ces trois méthodes sont basées sur les techniques d'analyse d'images par pixel, par texture et enfin par objet (figure 14). Les résultats sont exposés en deux parties : la première concerne la méthodologie et la deuxième les résultats de l'analyse comparée.

### **II.1. METHODOLOGIE**

Les images SPOT 5-THX multi-spectrales en supermode de 2.5 m de résolution ont été utilisées comme données de référence dans cette étude. Le supermode multi-spectral fait référence à un processus d'acquisition, spécifique à l'instrument HRG de SPOT 5. Il s'obtient en deux étapes. D'abord, une image SPOT 5-TH (très haute résolution) panchromatique de 2.5 m est obtenue à partir de deux images SPOT 5-HRG panchromatique de 5

m résolution acquises simultanément. Ces deux images possèdent les mêmes frontières. L'image SPOT 5-TH de 2.5 m est obtenue après interpolation, déconvolution et la suppression du bruit de deux images panchromatiques de 5 m (Latry *et al.*, 2001 ; Latry et Rougé, 2003).

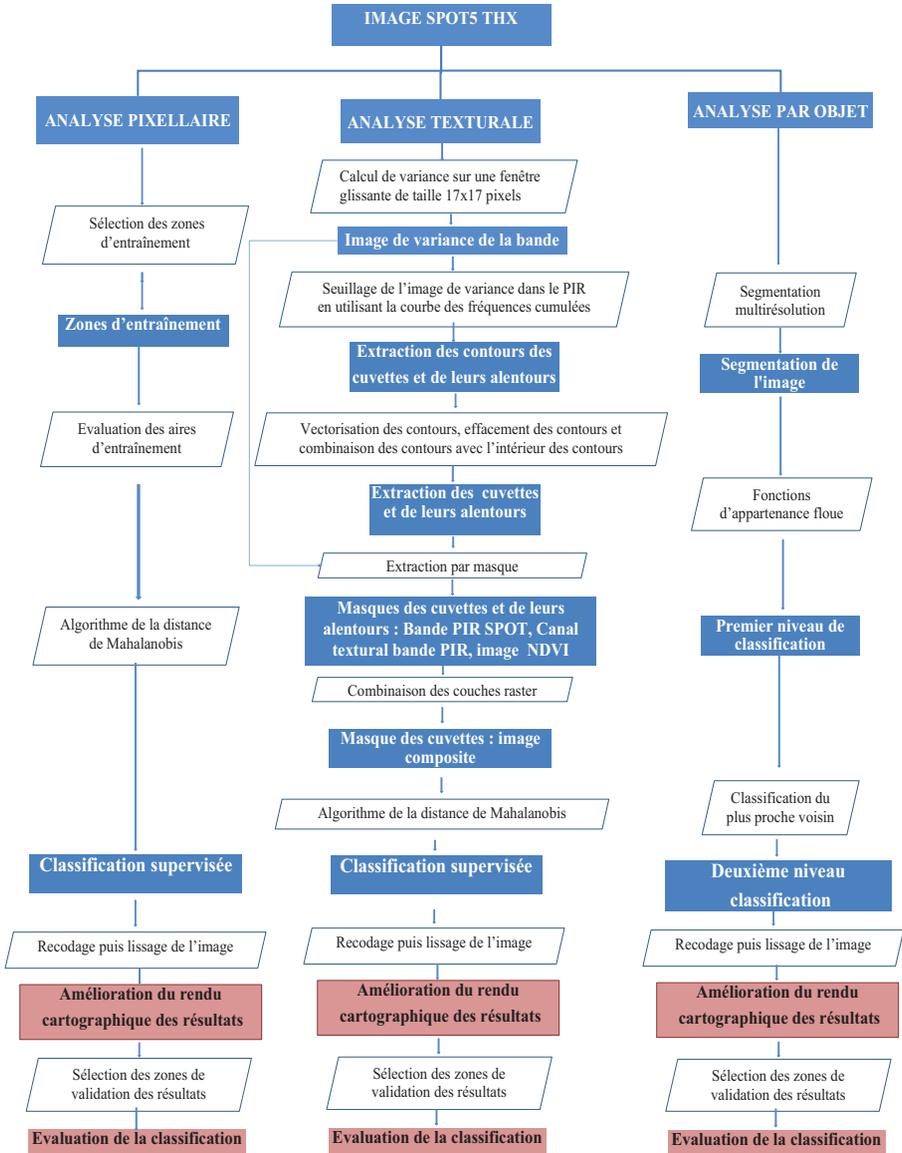


Figure 14 - Schéma synoptique de l'application des trois méthodes de détection des cuvettes par l'analyse pixellaire, texturale et par objet

Enfin, le supermode multi-spectral (SPOT 5-THX) est aussi une fusion de deux images SPOT 5 : une image SPOT 5-TH de 2.5 m de résolution et une image SPOT 5-HRG en mode multi-spectral de 10m de résolution. Le supermode couleur à très haute résolution ne comporte plus la bande du moyen infra rouge. Une image SPOT 5-THX est créée par la même méthode d'obtention qu'une image SPOT 5-TH.

Les données de référence (image SPOT 5-THX) ont été acquises en fin de saison des pluies. La période d'acquisition a été choisie parce qu'elle permet d'abord une identification rapide de cuvettes oasiennes en mettant en évidence leur végétation phréatophile et leur plan d'eau temporaire. Ensuite, elle permet d'éviter une quantité importante de nuages et de poussières sur les images. En effet, depuis le début de la «grande sécheresse » qui date de la fin des années soixante, le Niger oriental est devenu une zone productrice de poussières éoliennes ou lithométéores (Karimoune et Ozer, 1994). Les lithométéores réduisent la visibilité horizontale en saison sèche et pourraient tacher les images.

Les différentes méthodes d'analyse, d'identification et de classification appliquées et développées dans le cadre de cette étude ont été testées sur une mosaïque de six scènes d'images de SPOT 5-THX géoréférencées de 2.5 m de résolution (tableau 1). Elles ont été acquises entre octobre et décembre 2013 avec un niveau de traitement 2A. C'est-à-dire que les corrections radiométriques et géométriques des images avaient déjà été faites. L'information est stockée en huit bits.

*Tableau 1 - Caractéristiques des images SPOT 5-THX de 2.5m utilisées.*

<b>N°</b>	<b>Coordonnées</b>	<b>Dates d'acquisition (A/M/J)</b>	<b>heure de prise vue</b>	<b>de Mode de spectral</b>	<b>Nombre de bandes</b>
	076-322	13/12/25	09h27	THX	3
	077-322	13/10/25	09h25	THX	3
	078-322	13/10/04	09h30	THX	3
<b>SPOT-5</b>	076-323	13/11/25	09h27	THX	3
	077-323	13/11/05	09h20	THX	3
	078-323	13/11/15	09h20	THX	3

La réalisation de la mosaïque d'images s'est faite en deux étapes essentielles : l'égalisation des radiométries entre les images voisines ou histogrammes correspondants et l'assemblage des images suivant la meilleure ligne de raccord (Leruth, 2000). L'histogramme correspondant est un processus consistant à déterminer une table de conversion qui convertit l'histogramme d'une image pour ressembler à l'histogramme d'une autre (Pan *et al.*, 2009). L'histogramme correspondant est utile pour faire correspondre des scènes qui ont été prises à des jours différents ou bien qui sont légèrement différentes à cause de l'angle d'incidence des radiations du soleil ou des effets atmosphériques. Il permet donc de limiter les effets des écarts radiométriques entre des images acquises à des dates différentes.

Dans une mosaïque, les lignes de raccord permettent d'améliorer les zones de jonction entre deux images en définissant une zone de fusion le long du bord des lignes de raccord. La largeur de fusion est une valeur définie dans la table attributive de la ligne de raccord. La méthode consiste à analyser des images superposées et à déterminer le tracé des lignes de raccord où elles seront les moins perceptibles (Leruth, 2000). La méthode de lignes de raccord permet ainsi de limiter «les effets de bord» des images adjacentes.

Compte tenu de la taille de la zone d'étude et pour réduire les confusions entre les cuvettes et les autres objets proches en réflectance, un masque a été appliqué afin de différencier un à un les secteurs homogènes en aquifères. Il s'agit du secteur de socle magmatique du Mounio, celui du sédimentaire Quaternaire du Manga et enfin celui des aquifères alluviaux des Koramas (figure 2). Cette différenciation permet d'éviter des confusions dans les secteurs de nappes libres du Manga et de nappes libres des Koramas entre les cuvettes et les affleurements rocheux.

### **II.1.1. Reconnaissance de terrain et collecte des données**

Une première analyse préliminaire de la région sur la base des cartes topographiques et des images SPOT-THX a été effectuée pour discriminer les secteurs géomorphologiques et adopter une méthode de sélection des aires d'entraînement pour les classifications.

### ***II.1.1.1. L'établissement de la nomenclature***

La nomenclature ou clef d'interprétation a permis de définir les classes et leurs caractéristiques spectrales avant les classifications. Les classes définies sont d'ordre géomorphologiques. Elles se justifient du fait qu'elles sont du même ordre que les cuvettes dont l'identification constitue l'objectif de cette étude. Sur le plan topographique, les cuvettes forment des dépressions plus ou moins fermées.

Dans la zone d'étude on distingue les unités topographiques de cuvettes et celles associées aux cuvettes. Ces dernières sont composées d'édifices dunaires, d'affleurements rocheux et de vallées sèches. Cela fait quatre classes d'ensembles géomorphologiques établies en s'inspirant des découpages faits sur la base des cartes topographiques au 1/200000 de la zone (IGN Paris, 1962) et des observations de terrain.

### ***II.1.1.2. La sélection et contrôle des zones d'entraînement***

Compte tenu du nombre important de sites potentiels d'étude, une visite de terrain reposant sur une stratégie permettant de sillonner toute la zone des cuvettes du Département de Gouré a été effectuée en novembre 2014. Ainsi, plusieurs zones d'entraînement ont été prises pour caractériser la zone d'étude. Ces zones d'entraînement ont été choisies de façon à couvrir toute la zone d'étude. Elles ont été aussi délimitées par numérisation à l'écran sur images SPOT-THX avec à l'appui, la carte topographique de Gouré ND 32 XI au 1/200000 (IGN Paris, 1962) et des données de terrains. Les aires d'entraînement des classes définies dans la clé d'interprétation ont été échantillonnées dans trois secteurs : secteur nord (transect 1), secteur centre (transect 2) et secteur sud (transect 3). Au total, 180 cuvettes ont été choisies selon ces transects. Quant aux autres classes (vallées sèches, édifices dunaires et affleurements rocheux) compte tenu de leurs grandes surfaces unitaires et de leur localisation en blocs, les échantillons utilisés pour leur calibration sont plus étendus en surface que ceux utilisés pour les cuvettes. Les échantillons sont surtout étendus en surface au niveau des édifices dunaires. Le choix des aires d'entraînement des unités de paysage de cuvettes, de vallées sèches, d'édifices dunaires et d'affleurement rocheux s'est basé sur la perception visuelle de la représentation des caractéristiques de chaque unité qui sont entre

autres : la structure/texture, la forme, la tonalité et la distribution spatiale. Chaque classe est formée par une association d'unités d'occupation des sols. Par exemple, une cuvette peut être caractérisée par une savane arborée et/ou arbustive, une zone de cultures, un plan d'eau temporaire ou permanent et un sol nu à natron. C'est pourquoi chaque classe se traduit par des signatures spectrales d'unités d'occupation des sols groupées. Les échantillons choisis sont de taille suffisante pour caractériser statistiquement les classes d'objets qu'elles représentent.

## **II.1.2. Description des trois méthodes**

### ***II.1.2.1. La méthode de classification par pixel***

L'identification et l'extraction d'une classe ou de plusieurs classes d'occupation des sols peuvent être obtenues en attribuant la valeur radiométrique d'un pixel ou d'un groupe de pixels de l'image à une classe donnée (Lefebvre *et al.*, 2011). Lorsque la classification est basée sur les valeurs radiométriques des pixels, elle est dite classification purement radiométrique ou non contextuelle (figure 14). Dans ce cas, on opère pixel par pixel sans tenir compte du voisinage du pixel à classer.

L'analyse pixellaire a été exécutée par un algorithme de classification supervisée qu'est la distance de Mahalanobis (Arvor *et al.*, 2008; Idbraim, 2009). Cet algorithme de la distance de Mahalanobis s'appuie sur des surfaces d'entraînement dont il extrait les signatures afin de procéder à la classification de l'image. L'algorithme de la distance de Mahalanobis a été utilisé comme paramètre «classificateur» en raison de ses performances élevées par rapport à d'autres méthodes (Bar-Hillel *et al.*, 2005; Perumal et Bhaskaran, 2010).

Une analyse de contiguïté des images classées a été utilisée pour grouper les pixels contigus semblables dans une classe et lisser les classes car celles-ci présentent souvent un manque de cohérence spatiale (tâches ou trous dans les classes). Ainsi, les différentes unités qui composent les images ont été identifiées en regroupant les pixels jointifs et similaires. La méthode consiste d'abord à fusionner un pixel avec ses huit pixels voisins de la même classe. Ensuite, les pixels isolés c'est-à-dire ceux qui sont différents de leurs huit voisins semblables, ont été supprimés à partir de l'examen des pixels de voisinage. Enfin, le pixel éliminé est homogénéisé avec ses voisins. Une

cuvette est détectée lorsque la fusion d'un groupe de pixels semblables contigus dans la même classe est supérieure ou égale à 0.2 ha. Autrement dit, les cuvettes identifiées par cette méthode sont celles ayant une extension minimale correspondant à cette superficie.

### ***II.1.2.2. La méthode de classification par texture***

L'analyse de texture consiste à trouver des attributs descriptifs qui quantifient les caractéristiques de granularité des images, de directionnalité ou encore de finesse, utilisées pour qualifier les textures. Ces caractéristiques texturales sont généralement liées aux propriétés des objets que l'image contient (Thomas *et al.*, 2000). Une analyse de texture d'une image permet d'obtenir des informations sur la nature des objets qui la constituent, de la segmenter en régions homogènes, d'améliorer la qualité de l'image (restauration), ...

La démarche consiste à extraire un ou plusieurs paramètres caractéristiques de cette texture. Ces paramètres sont désignés sous le terme d'attributs texturaux (Haralick *et al.*, 1973). Selon Tuceryam et Jain (1998), les différentes méthodes d'analyse de texture peuvent se répartir en quatre catégories. D'abord les méthodes structurelles, elles sont adaptées aux textures macroscopiques et régulières. Ensuite les méthodes statistiques qui sont basées sur des paramètres statistiques (probabilité de 1<sup>er</sup> ordre, 2<sup>ème</sup> ordre) estimés pour chaque pixel de l'image. On note aussi les méthodes fréquentielles ou de modélisation réparties en deux groupes (modèles de champs aléatoires markoviens et méthodes fractales). Enfin les méthodes spatio-fréquentielles ou traitement du signal désignent les représentations spatio-fréquentielles.

La méthode développée est réalisée en 3 étapes :

- **Étape 1 : Distribution de la variance cumulée, seuillage et classification**

Dans le cadre de cette étude, l'image de texture est obtenue à partir du calcul d'un descripteur statistique de premier ordre (la variance) dans une fenêtre glissante de 17 pixels\*17 pixels (figure 14 et 15). La valeur de ce descripteur est attribuée au pixel central de la fenêtre de l'image résultante. Le

descripteur calcule l'hétérogénéité locale de la fenêtre 42.5 m par 42.5 m donc 1806 m<sup>2</sup>) à partir des images de SPOT 5-THX à 2.5 m de résolution. Le choix de cette surface se justifie par la taille des cuvettes oasiennes dont la taille moyenne des plus petites est proche de 0.2 ha ou 2000m<sup>2</sup> selon les observations faites lors de nos déplacements sur le terrain. Ainsi, en analyse texturale, la taille optimale de la fenêtre devrait varier selon la taille des objets qui constituent chacune des classes (Hodgson, 1998). La variance a été choisie car elle permet de représenter une information globale de l'image et de bien mettre en évidence les contours des cuvettes oasiennes (figure 15).

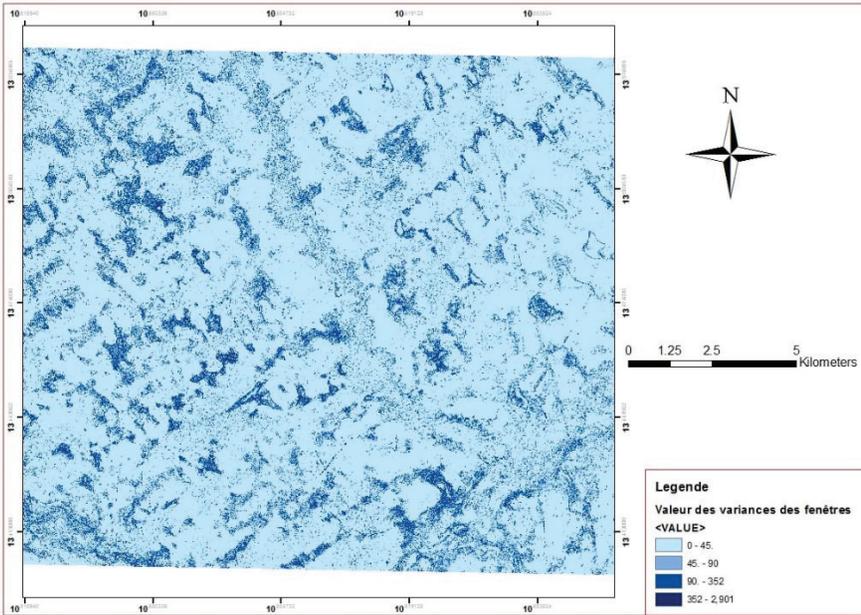


Figure 15 - Image de la variance des niveaux de gris de la bande infra-rouge d'une image SPOT 5-THX dans une fenêtre de 17 pixels sur 17

La variance traduit l'homogénéité de l'ensemble des pixels de la fenêtre (figure 15). Une variance faible indique une zone homogène. De ce fait, à l'intérieur des cuvettes on observe des valeurs de variance faible. Cependant les fenêtres de très forte variance constituent les limites qui se trouvent à cheval entre les cuvettes et les vallées sèches, les édifices dunaires et les collines rocheuses. Cette observation est utilisée pour repérer, par l'analyse de la variance de la fenêtre, les zones les plus probables qui correspondent à des contours de cuvettes.

Notons que l'analyse texturale permet de repérer des zones plus ou moins homogènes. La méthode mise au point s'appuie d'abord sur l'analyse et l'utilisation de l'histogramme cumulé de l'image texturale (figure 16). C'est une technique de seuillage d'image utilisant la courbe de l'histogramme cumulé. La valeur du seuil S déterminée tient compte de la distribution des différentes valeurs des attributs texturaux (ici, la variance) des pixels de l'image.

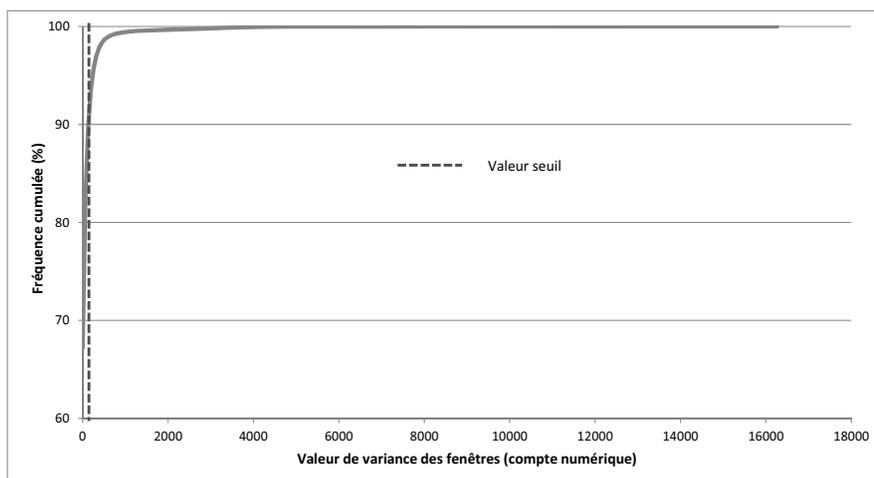


Figure 16 - Fréquence cumulée des valeurs de variance dans une fenêtre de 0.2 ha du canal proche infrarouge d'image SPOT 5-THX

L'idée est de sélectionner les contours les plus significatifs. Le choix d'un pourcentage de pixels et donc des contours les plus significatifs conduit à la valeur du seuil S à utiliser dans le seuillage de l'image. Les variances des fenêtres situées à cheval entre les dunes, les affleurements rocheux et les cuvettes seront toujours plus élevées que dans des milieux homogènes. Cette observation est utilisée pour repérer par l'analyse de la variance de la fenêtre les zones les plus probables qui correspondent à des contours de cuvettes. Par essai-erreur, sur base de l'analyse visuelle d'un échantillon de cuvettes, seuls les dix derniers pourcents des fenêtres, c'est-à-dire ceux présentant les plus grandes variances dans la bande proche infra-rouge ont été retenus comme pouvant indiquer la présence d'une bordure de cuvette. En fréquence cumulée, 90 % des fenêtres seront donc exclues car situées sous la valeur seuil S. Cette

valeur seuil a permis de faire une extraction des bordures des cuvettes. A partir des bordures des cuvettes, on essaie de regrouper les pixels à l'intérieur pour constituer les cuvettes.

L'outil d'analyse « effacer » d'ArcGis a été utilisé pour faire ce regroupement. Cet outil permet de soustraire les couronnes ou limites des alentours des cuvettes dans celles de la zone d'étude. Il crée une classe d'entités en superposant la limite de la zone d'étude en entrée (figure 17 A) aux polygones des bordures des cuvettes appelé ici « entités d'effacement » (figure 17 B). Seules les parties de la zone d'étude en entrée situées hors des limites extérieures des entités d'effacement sont copiées vers la classe d'entités en sortie (figure 17 C).

Cette classe d'entité en sortie est constituée par deux types de polygones. Le premier correspond aux pixels à l'intérieur des bordures des cuvettes et est constitué par plusieurs petits polygones. Par contre, le deuxième constitué par les pixels à l'extérieur des bordures de cuvettes, représente les autres unités (vallées sèches et édifices dunaires et collines rocheuses) qui font frontière avec les cuvettes. Ces unités sont représentées par un seul polygone avec une superficie de loin plus grande que l'ensemble des polygones « cuvettes ». Les cuvettes ont été déterminées par la suite en fusionnant les polygones représentant l'intérieur des cuvettes à ceux constituant leurs bordures. À partir des polygones des cuvettes ainsi créées, un premier masque des cuvettes et leurs environs sur une image calculée en combinant les canaux texturaux aux images d'origine a été réalisé.

Le masque des cuvettes a été déterminé en combinant les polygones représentant l'intérieur des cuvettes à ceux constituant leurs bordures (figure 17 D). À partir des polygones des cuvettes précédemment créés, l'image du masque des cuvettes et leurs environs a été extraite à partir d'une image composite. Cette image composite est obtenue en combinant l'image de variance, celle du NDVI et la bande spectrale infra rouge de l'image SPOT (figure 18 A).

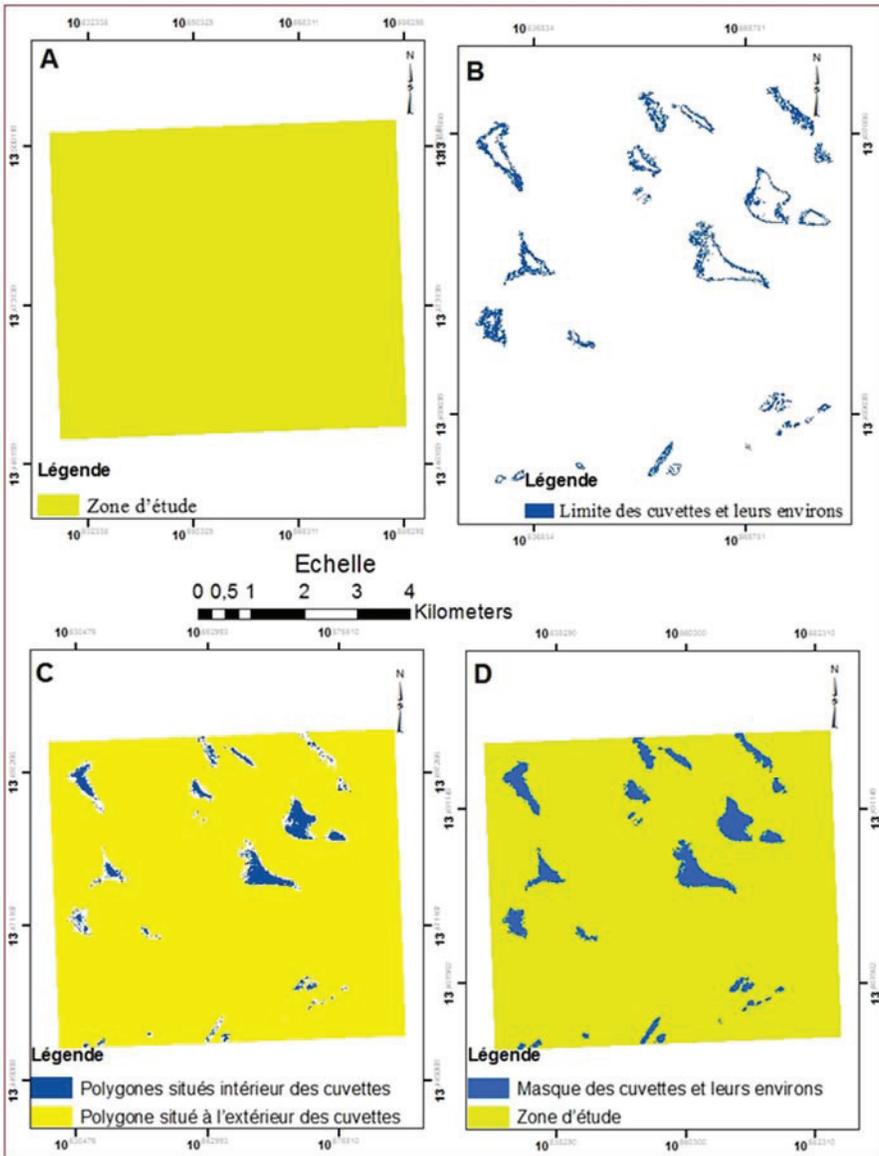


Figure 17 - L'effet de l'outil d'analyse « effacer » et de gestion des données « combiner » d'ArcGIS sur une image de SPOT 5-THX d'une partie de la zone d'étude

L'extraction des contours des cuvettes oasiennes, en utilisant une approche de seuillage de la variance, comme expliqué plus haut, conduit à un partitionnement de l'image en deux parties : une partie qui constitue les

cuvettes de la zone (figure 18 B) et l'autre partie les autres objets qui composent l'image (figure 18 C).

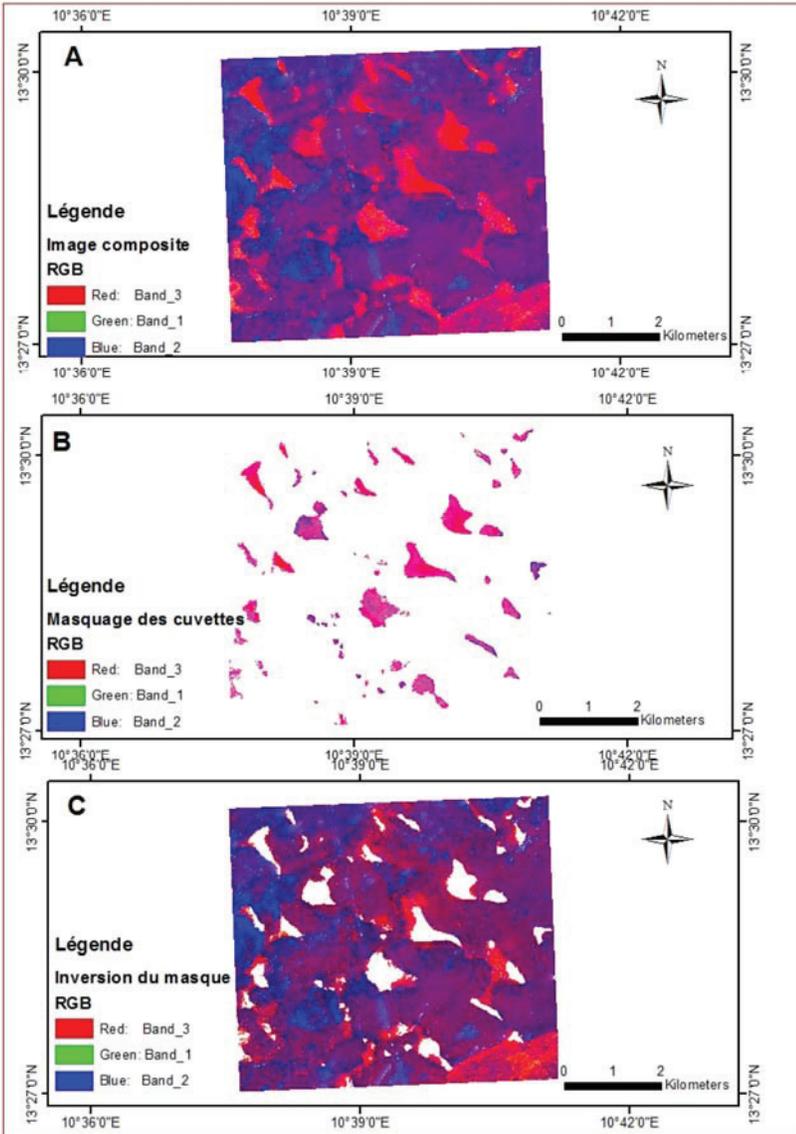


Figure 18 - Image composite issue de la combinaison de la bande PIR, image de variance et du NDVI (A), image composite du masquage des cuvettes (B) et inversion du masque (C)

Ainsi, une première classification supervisée a été appliquée au masque des cuvettes en utilisant l'algorithme de la distance de Mahalanobis pour améliorer la précision des résultats (figure 14).

- **Étape 2 : Combinaison et classification**

Les classes représentant les autres objets (vallées sèches, édifices dunaires et collines rocheuses) ont été d'abord délimitées à partir de l'inverse du masque des cuvettes (figure 18). Ensuite, une image dérivée ou composite qui les représente a été créée (figure 18 C). Elle est obtenue en combinant la bande du PIR de l'image de SPOT 5-THX, l'image de texture et le NDVI. Enfin, une autre classification effectuée uniquement sur cette image composite a permis de détecter les vallées sèches, les édifices dunaires, les collines et les cuvettes oasiennes identifiées partiellement lors de l'étape 1.

- **Étape 3 : Fusion**

Les résultats de la classification de l'étape 1 et ceux de l'étape 2 ont été fusionnés afin de regrouper l'ensemble des unités géomorphologiques. La fusion permet d'agréger les unités géomorphologiques semblables contiguës issues des étapes 1 et 2. La table des données à fusionner contient exactement les mêmes attributs, sinon il risque d'y avoir des problèmes au niveau de l'interprétation. Un effort préalable d'harmonisation des tables d'attributs et de leurs contenus a donc été effectué.

### ***II.1.2.3. La méthode de classification par objet***

Contrairement aux méthodes précédentes, la démarche orientée-objet (figure 14) ne traite pas le pixel de manière isolée, mais des ensembles de pixels contigus appelés «objets interprétés» en se basant sur leurs valeurs spectrales, leur taille, leur forme, leur contexte (Definiens professional 8.7, 2011). Le traitement réalisé avec le logiciel eCOGNITION se fait en trois principales étapes (Sparfel *et al.*, 2010). La première étape consiste en la création du projet eCOGNITION et à l'importation des données vectorielles ou raster. La deuxième étape est la segmentation de l'image. Elle consiste à effectuer une segmentation de l'image pour générer des objets. Cette étape permet donc d'extraire des « primitives » des objets-images qui deviendront le support pour les classifications à venir. L'algorithme de segmentation nommé multirésolution a été utilisé. Il génère des objets adjacents de taille et

de forme similaires bien répartis dans l'espace suivant des critères d'homogénéité définis en prenant en compte l'hétérogénéité au sein d'un objet (Definiens professional 8.7, 2011).

Le seuil d'hétérogénéité est calculé en fonction de plusieurs paramètres définis par l'utilisateur tels que la couleur (qui renvoie à la valeur spectrale des objets), et la forme (qui correspond à la texture des objets) auxquels on peut attribuer un poids relatif (Sparfel *et al.*, 2010).

La dernière étape du traitement est la classification des objets créés précédemment. Ces derniers possèdent des caractéristiques diverses : valeur moyenne des objets, écart-types, luminosité... Ces caractéristiques permettent de les classer. La classification est faite à deux niveaux (Sparfel *et al.*, 2010). Le premier niveau se base sur les fonctions d'appartenance floue. Pour une caractéristique choisie, ces fonctions affectent ou non un objet permettant ainsi de le rattacher à une classe, grâce à des intervalles de valeurs. Cette technique peut ainsi s'apparenter à un seuillage «flou». Les classes identifiées à ce niveau comportent beaucoup de confusions.

Pour réduire ces confusions, un deuxième niveau de classification a été effectué séparément au niveau de chaque classe créée précédemment. Ce niveau utilise l'algorithme de classification du plus proche voisin (Nearest Neighbour). Elle est fondée sur l'acquisition (saisie ou importation) d'objets d'entraînement par l'utilisateur (Mohammed et Rusthum, 2010). Après la déclaration des objets échantillons, on procédera à l'optimisation des caractéristiques les plus aptes à la séparation des classes, en conjonction avec un classificateur du plus proche voisin. Il s'agit de comparer les caractéristiques (moyenne, écart type, luminosité etc.) des classes et de trouver la combinaison de caractéristiques qui produit la plus grande séparabilité dans la gamme de variables spectrales, contextuelles, de textures et de formes disponibles entre les échantillons des différentes classes (Wellens, 2014).

### **II.1.3. Evaluation des classifications réalisées**

La dernière étape d'une classification d'image consiste à valider la classification en évaluant sa pertinence (vérification à posteriori). La validation s'est faite sur ARCGIS 10.1. Pour cela, le taux des pixels bien classés est calculé dans une matrice de confusion réalisée grâce à un fichier de

référence représentant la réalité du terrain ou sites de vérification (Assami *et al.*, 2014; Mostephaoui et Bensaid, 2014). Les sites ayant servi à la vérification sont indépendants des sites d'entraînement pour ne pas biaiser le processus de contrôle. Ils ont été pris aléatoirement directement sur le terrain ou à partir de documents auxiliaires (cartes topographiques et d'occupation des sols existantes). Les sites d'entraînement représentent des zones sur lesquelles le logiciel se base pour faire les regroupements des pixels. Dans ces zones, les unités d'occupation des sols sont connues, et l'on demande au logiciel de prendre ces zones comme référence pour classifier et généraliser à toute l'image. 164 polygones de cuvettes oasiennes et 100 polygones de chacune des autres classes (vallées sèches, édifices dunaires et affleurements rocheux ou collines) ont été échantillonnées sur le terrain comme points de contrôle des classifications avec un GPS.

Pour évaluer les résultats comparés des classifications faites, un même jeu de données de validation a été utilisé pour dresser l'ensemble des matrices de confusion. Il s'agit d'un tableau de contingence confrontant les classes obtenues sur la carte (colonnes) et les classes identifiées (lignes) pour l'échantillon. Sur la diagonale, on trouve donc les valeurs bien classées et, hors de la diagonale, les éléments mal classés. La somme des valeurs sur une ligne donne le nombre d'exemplaires théoriques de la catégorie. Si les classes sont indépendantes, la position de l'erreur n'a aucune signification. Si, par contre, les classes ne sont pas indépendantes, on peut définir une sorte de gradation dans les erreurs. Différents indicateurs de précision sont calculés: coefficient Kappa, précision globale, précision pour l'utilisateur et pour le réalisateur (Fleiss et Cohen, 1973 ; Congalton, 1991).

Les performances des trois méthodes ont été également évaluées pour déterminer leurs capacités à détecter les cuvettes à travers un modèle de prédiction. Ce modèle est aussi présenté sous forme de matrice de confusion (Schaefer, 1990). Dans le tableau 2, les cuvettes observées sur le terrain représentent les lignes et celles détectées par une des méthodes proposées, les colonnes. Les points de contrôle utilisés pour évaluer les performances de ces trois méthodes de détection des cuvettes oasiennes sont composés de 605 cuvettes oasiennes échantillonnées dont 164 déterminées sur le terrain et 441 par analyse et interprétation visuelles d'images SPOT 5-THX. Deux situations

se présentent à l'interception d'une ligne et d'une colonne : « positif ou présence de cuvette » ou « négatif ou absence de cuvette ». Lorsque cette interception donne le même signe on parle de détection correcte (deux signes positifs) ou de rejets corrects (deux signes négatifs). Mais lorsque l'occurrence d'une ligne et une colonne donne deux (2) signes contraires, on parle soit de faux positif (correspondant à une prédiction par la méthode alors qu'il n'y a en réalité pas de cuvette), soit de faux négatif (quand la méthode ne détecte aucune cuvette alors que celle-ci existe bien sur le terrain).

Tableau 2 - Notation d'une matrice de confusion contenant les effectifs de détections correctes (DC), faux positifs (FP), faux négatifs (FN) et rejets corrects (RC)

		Cuvettes observées (méthode de référence)		Total détecté
		Positif	Négatif	
Cuvettes détectées (méthode alternative)	Positif	DC, Détections correctes +/+	FP, Faux positifs -/+	DC + FP
	Négatif	FN, Faux négatifs +/-	RC, Rejets corrects -/-	FN + RC
Total observé		DC + FN	FP + RC	N

Le nombre total de cuvettes observées sur le terrain et détectées par une méthode est noté N.

Trois indicateurs ont été calculés à partir de ces résultats pour comparer et évaluer les trois méthodes :

- la probabilité de détection (POD) ou sensibilité relative est la capacité de la méthode à détecter les cuvettes lorsque les cuvettes sont bien présentes en réalité avec la méthode de référence. En d'autres termes c'est la proportion des cuvettes observées sur le terrain et dont la méthode alternative est positive. La POD varie de 0 pour une méthode alternative qui détecte mal les cuvettes à 100 pour celle qui les détecte très bien.

$$POD (\%) = \frac{DC}{DC + FN} * 100$$

- le taux de faux positif (TFP), est la probabilité qu'une cuvette soit détectée par une méthode alors qu'elle n'existe pas en réalité sur le terrain. TFP varie d'une échelle de 0 (parfait) à 100 (très mauvais). Elle est définie comme suit :

$$\text{TFP (\%)} = \frac{\text{TP}}{\text{DC} + \text{FP}} * 100$$

- l'indice critique de succès CSI (Critical Success Index) qui permet de quantifier la qualité de la méthode. CSI varie d'une échelle de 0 (très mauvais) à 1 (parfait).

$$\text{CSI} = \frac{\text{DC}}{\text{DC} + \text{FN} + \text{FP}}$$

Le CSI est fréquemment utilisé parce qu'il tient compte à la fois des faux positifs et des faux négatifs dans les analyses.

Enfin, les surfaces de cuvettes obtenues par l'analyse d'images par objet sont comparées à des données de référence dessinées à partir des positions réelles des points obtenus sur le terrain par le GPS. Les surfaces de 14 cuvettes ont été délimitées sur le terrain. La comparaison des surfaces obtenues par ces deux méthodes permet de calculer les erreurs de détection des surfaces de cuvettes ou marge d'erreur (ME) de la méthode d'analyse d'images par objet en ce qui concerne la délimitation des vraies limites d'une cuvette. La marge d'erreur est obtenue en faisant le rapport entre la différence de la surface d'une cuvette donnée par l'analyse par objet et de la surface de référence (surface donnée par le GPS) divisée par la surface de référence, le tout est multiplié par cent.

## **II.2. RESULTATS ET DISCUSSION**

### **II.2.1. Evaluation de la classification**

La matrice de confusion de l'analyse pixellaire (tableau 3) montre comme erreur d'excédents pour les cuvettes une valeur de 48 %, les vallées sèches 48 %, les édifices dunaires 8 % et les collines 7 %. Cette erreur voudrait dire par exemple pour les pixels des cuvettes, que seulement 52 % de ces dernières sur la carte correspondent réellement à des pixels de cuvettes. 82 % des pixels issus de la classe de référence « cuvette » ont été affectés à la classe des cuvettes (précision pour le réalisateur).

Les résultats de la classification donnent aussi une précision globale de 81 %. Cependant un certain nombre d'édifices dunaires et de vallées sèches ont été classés comme des cuvettes. Cette confusion s'explique par le fait que ces unités reflètent de la même façon sur l'image. Par exemple, un plan d'eau reflète de la même manière que cela soit dans une cuvette, une vallée sèche et au pied d'une colline. Aussi, les sols nus des sommets de collines peuvent refléter de la même manière que les zones d'exploitation de natron à l'intérieur des cuvettes. Il faut aussi noter qu'une cuvette oasienne est caractérisée par une forte végétation de palmiers. Cette végétation peut aussi se refléter de la même manière que celle des gomméraires des vallées sèches de la zone.

Les résultats de l'analyse texturale donnent une meilleure précision par rapport à l'analyse par pixel (tableau 4). La précision globale passe de 81 % à 90 %. La précision de détection des collines a plus que doublé. Elle passe de 32 % à 68 %. La précision de détection des cuvettes oasiennes s'est améliorée de 39 % "pour l'utilisateur".

Quant à la précision pour le réalisateur, elle est calculée selon les colonnes et correspond au pourcentage de pixels issus des classes de référence bien classés dans les groupes d'affectation. Ainsi, on constate que 20 % des cuvettes appartenant à l'échantillon de référence ont été affectés aux vallées sèches et aux édifices dunaires. La précision pour le réalisateur en ce qui concerne les cuvettes est donc de 80 %. Concernant les autres classes, seulement 13 % des pixels ont été classés par erreur comme des cuvettes.

Tableau 3 - Matrice de confusion de la classification par analyse pixellaire (unité de base est le pixel)

	Cuvette	Vallée sèche	Edifice dunaire	Colline	Total	Précision pour l'utilisateur (%)
<b>Cuvette</b>	1697642	124868	1438892	2448	3263850	52
<b>Vallée sèche</b>	10822	1741668	1517304	0	3362794	52
<b>Edifice dunaire</b>	278216	442139	14956673	571804	16248832	92
<b>Colline</b>	0	0	20572	274235	294807	93
<b>Total</b>	<b>2079680</b>	<b>2308675</b>	<b>17933441</b>	<b>848487</b>	<b>23170283</b>	
<b>Précision pour le réalisateur (%)</b>	82	75	83	32		
<b>Précision globale (%)</b>						81
<b>Coefficient Kappa</b>						0.80

Tableau 4 - Matrice de confusion de la classification par analyse texturale (unité de base est le pixel)

	Cuvette	Vallée sèche	Edifice dunaire	Colline	Total	Précision pour l'utilisateur (%)
Cuvette	1597220	31037	198917	8162	1835336	87.03
Vallée sèche	40283	1486624	1090786	0	2617693	56.79
Edifice dunaire	349956	393740	17005445	260362	18009503	94.42
Colline	0	5005	15130	558442	578577	96.52
<b>Total</b>	<b>1987459</b>	<b>1916406</b>	<b>18310278</b>	<b>826966</b>	<b>23041109</b>	
Précision pour le réalisateur (%)	80.36	77.57	92.87	67.53		
Précision globale (%)		89.61				
Coefficient Kappa		0.90				

Ces performances de l'analyse texturale par rapport à l'analyse pixellaire concordent avec les résultats déjà exposés par plusieurs auteurs. Ainsi, les résultats obtenus par Guo *et al.* (2010) montrent qu'avec le seuillage de l'histogramme du descripteur d'attribut qu'est la variance, on peut parvenir à une amélioration significative, parfois de plus de 10 % en termes d'exactitude de la classification, sur la méthode par pixel. Franklin *et al.* (2000) ; Franklin *et al.* (2001) ; Zhang *et al.* (2004) ont montré qu'en combinant les canaux de texture et les images spectrales, on peut avoir une précision globale de 75 à 100 % selon le niveau de hiérarchisation des classes.

Par rapport aux deux méthodes précédentes, l'analyse par objet (tableau 5) donne moins d'erreurs excédents et d'erreurs de déficits pour toutes les classes. Les cuvettes ont été détectées avec une précision de 93 %. Les précisions de détection des vallées sèches, des édifices dunaires et des collines ont augmenté respectivement de 6 %, 7 % et 19 % par rapport à celles identifiées par analyse texturale. L'approche par objet est plus performante que celles pixellaire et texturale car le coefficient Kappa peut être considéré comme très satisfaisant.

Nos résultats confirment les résultats de beaucoup d'autres études qui ont prouvé les meilleures performances de la classification objet-orientée sur la classification image traditionnelle basée sur le pixel. Les auteurs (Whiteside et Ahamat, 2005; Yuan et Bauer, 2006 ; Qian *et al.*, 2007; Wang, 2004; Willhauck, 2000; Duro *et al.*, 2012) ont montré que la technique de la classification par objet donne de meilleurs résultats que les résultats obtenus en utilisant la technique de la classification par pixel.

Cependant, on observe de façon générale sur les trois matrices de confusion (tableau 3 à 5) que les unités en dépression présentent une diversité plus forte que les édifices dunaires et collines. Ainsi, lorsque la diversité est plus forte, les possibilités de confusion sont aussi plus grandes. Cela veut dire que les pixels composant une cuvette sont dans un plus large spectre et que ceux composant les édifices dunaires, et les collines sont dans un spectre plus réduit. Ceci est statistiquement cohérent avec nos résultats.

Tableau 5- Matrice de confusion de la classification par analyse par objet (unité de base est le pixel)

	<b>Cuvette</b>	<b>Vallée sèche</b>	<b>Edifice dunaire</b>	<b>Colline</b>	<b>Total</b>	<b>Précision pour l'utilisateur (%)</b>
<b>Cuvette</b>	1856397	80845	81517	0	2018759	92
<b>Vallée sèche</b>	4591	1624029	20189	0	1648809	99
<b>Edifice dunaire</b>	130692	235801	18287735	112973	18767201	97
<b>Colline</b>	800	0	500	735514	736814	100
<b>Total</b>	<b>1992480</b>	<b>1940675</b>	<b>18389941</b>	<b>848487</b>	<b>23171583</b>	
<b>Précision pour le réalisateur (%)</b>	93	84	99	87		
<b>Précision globale (%)</b>				97		
<b>Coefficient Kappa</b>				0.97		

Une deuxième évaluation des trois méthodes de classification a permis de confirmer la plus performante en ce qui concerne la détection des cuvettes (tableau 6). En effet, compte tenu du nombre de cuvettes détectées et des grands écarts entre les résultats des trois (3) approches, l'évaluation des performances de ces méthodes détermine le nombre le plus probable de cuvettes qui s'approche de la réalité terrain. Sur les 605 cuvettes oasiennes échantillonnées sur le terrain (164) et par interprétation visuelle d'images (441), on note 98 % de probabilité de détection de cuvette selon l'approche par pixel, 99 % selon la méthode texturale et 99 % pour celle par objet. La probabilité de détection est la capacité d'une méthode à identifier les cuvettes observées sur le terrain et par interprétation visuelle d'images. On constate que ces trois méthodes identifient bien les cuvettes existantes sur le terrain. Cependant, il faut noter que parmi les cuvettes détectées, certaines n'en sont pas comme en témoigne le taux des faux positifs. Les faux positifs représentent donc les « fausses » cuvettes oasiennes détectées par la méthode alternative. On observe beaucoup de faux positifs (tableau 6) par les méthodes par pixel (31 %) et par texture (22 %).

*Tableau 6 - Calcul de l'indice critique de succès, de la sensibilité relative et du taux de faux positifs pour les trois méthodes de détection des cuvettes par l'analyse pixellaire, texturale et par objet*

	DC	RC	FN	FP	N	POD (%)	TFP (%)	CSI
Pixel	595	0	10	263	868	98	30.7	0.69
Texture	598	0	7	166	771	99	21.7	0.78
Objet	600	0	5	33	638	99	6.5	0.94

On note aussi des faux négatifs, c'est-à-dire des cuvettes observées sur le terrain ou par analyse d'image SPOT 5-THX et qui ne sont pas détectées par la méthode alternative. C'est avec l'analyse par objet qu'elles sont moins nombreuses.

Ainsi pour chacune des trois méthodes utilisées dans cette étude, on constate des faux positifs et des faux négatifs. C'est pourquoi l'indice critique de réussite qui prend en compte le taux de faux positifs et de faux négatif a été utilisé. Il traduit la qualité de l'accord entre l'estimation de la cuvette

identifiée par une méthode et la vraie cuvette observée sur le terrain ou par interprétation visuelle d'images SPOT 5-THX, en dehors des erreurs aléatoires. L'analyse par objet a donné la plus grande valeur de CSI (0.94). Elle est donc incontestablement la méthode dont les résultats s'approchent le plus de la réalité de terrain. En tenant compte des erreurs de plus ou moins 0.06 de l'analyse par objet obtenues à partir CSI, on peut estimer le nombre total des cuvettes oasiennes du Département de Gouré à 11300.

Ce protocole d'évaluation des performances d'un modèle répond bien à l'objectif de cette recherche qui consiste à identifier et à localiser les cuvettes oasiennes dans le Département de Gouré. L'indice critique de réussite est un bon indicateur permettant d'estimer le taux d'erreur d'une classification.

L'analyse par texture est meilleure que celle par pixel. Il faut cependant noter que, selon certains auteurs, on peut obtenir une performance encore améliorée de l'analyse texturale en faisant une combinaison de plusieurs attributs texturaux (Wellens, 2014). Mais cela conviendrait surtout pour une petite zone car les procédés de l'analyse texturale ont l'inconvénient d'occuper beaucoup « d'espace disque » et de prendre énormément de temps. C'est d'ailleurs pourquoi cette étude n'a utilisé qu'un seul attribut textural qu'est la variance.

### **II.2.2. Comparaison des résultats obtenus par les trois (3) techniques d'analyses pixellaire, texturale et par objet**

Une comparaison visuelle des résultats obtenus sur une partie de la zone d'étude montre des différences importantes entre les classifications (figure 19). La classification basée sur le pixel contient beaucoup de confusion entre les classes. Les analyses pixellaire et texturale identifient les alentours des cuvettes comme étant des vallées sèches alors que l'analyse par objet les classe dans les édifices dunaires. Les cuvettes oasiennes sont remarquables sur la figure 19 à travers leurs formes circulaire, allongée ou amiboïde (Ambouta, 2006). Elles sont parfois isolées et se localisent généralement à l'extrémité de vallées sèches. Ceci confirme les travaux d'Ambouta (2006) qui observe les cuvettes à l'extrémité des bas-fonds. Quant aux vallées sèches, elles ont beaucoup de caractéristiques communes avec les cuvettes mais elles sont de loin plus étirées.

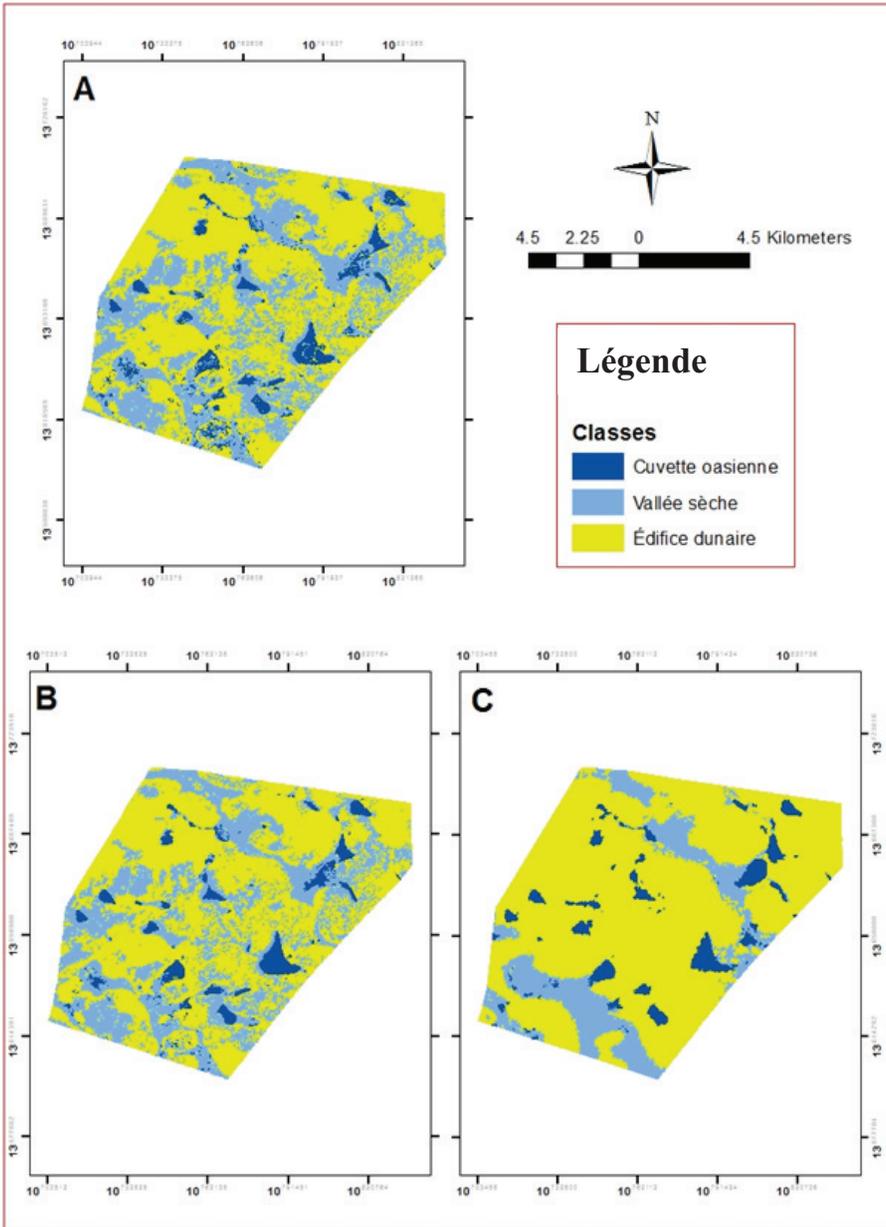


Figure 19 - Résultats de la classification de l'analyse par pixel (A), par texture (B) et par objet (C) d'une partie de la zone d'étude

L'analyse texturale montre une amélioration des résultats par rapport à l'analyse pixelaire (figure 19 B). Enfin, en se basant sur les caractéristiques

des cuvettes, on peut dire qu'avec l'analyse par objet, les objets (cuvettes oasiennes, vallées sèches et édifices dunaires) semblent les mieux identifiés (figure 19 C).

Le tableau 7 récapitule le nombre et les superficies des cuvettes obtenus selon les trois analyses. L'analyse par objet qui présente la meilleure précision a donné moins de cuvettes en nombre. L'approche par pixel a repéré un plus grand nombre de cuvettes oasiennes et totalise des superficies qui sont de loin supérieures à celles des deux autres méthodes. Ceci s'explique par une très forte confusion par cette méthode entre les cuvettes oasiennes et les autres classes. Ceci corrobore bien les confusions entre les classes obtenues dans la figure 19.

L'analyse texturale a détecté 18072 cuvettes oasiennes qui occupent cependant moins de surface que celle par objet. Cette technique basée sur la texture a dû partitionner certaines cuvettes dégradées où s'observe une certaine discontinuité de texture. L'approche a aussi sans doute sous-estimé les superficies des grandes cuvettes (figure 20).

*Tableau 7 - Superficie en hectares et nombre de cuvettes oasiennes (>0.2 ha) identifiés dans la zone d'étude*

	<b>Analyse par pixel</b>	<b>Analyse par texture</b>	<b>Analyse par objet</b>
<b>Nombre</b>	21145	18072	11300
<b>Superficie (ha)</b>	64961	26250	32061

Dans le cadre de cette étude, la taille minimale des cuvettes oasiennes retenue est 0.2 ha. Ce chiffre correspond aux plus petites cuvettes exploitées qui sont rencontrées sur le terrain. La distribution des cuvettes selon la taille (figure 20) montre un nombre très élevé de cuvettes inférieures à 0.5 ha.

L'analyse par objet a détecté 4527 cuvettes oasiennes de taille inférieure à 0.5 ha alors que chacune des deux autres approches en identifie le double. D'après nos observations de terrain, la plupart de ces cuvettes sont soit inexploitées, soit abandonnées ou en voie de disparition car menacées d'ensablement. Le nombre de cuvettes oasiennes identifiées par analyse par objet est inférieur au nombre obtenu par les méthodes par pixel et par texture

quelle que soit la taille. On dénombre également 70 cuvettes dont la superficie est supérieure ou égale à 50 ha par la méthode pixellaire alors que celles par texture et par objet en détectent respectivement 27 et 53.

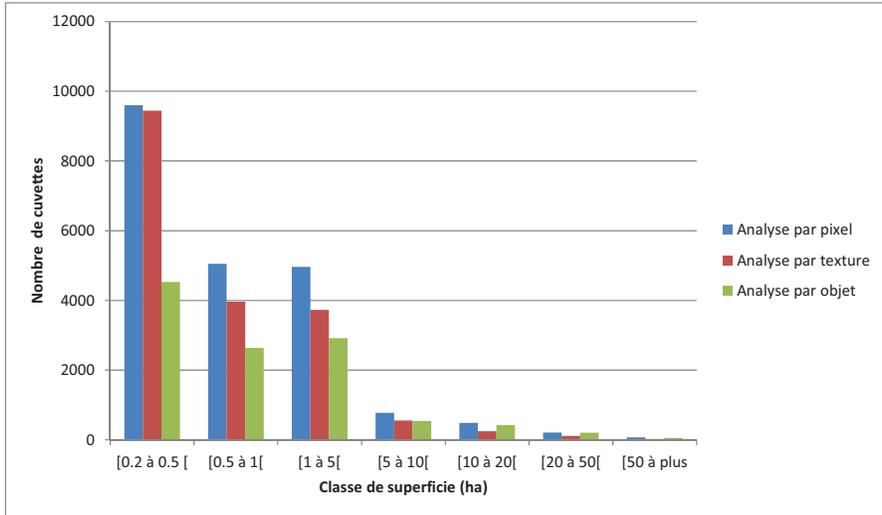


Figure 20 - Nombre de cuvettes selon les classes de surface d'après les trois méthodes de détection des cuvettes par l'analyse pixellaire, texturale et par objet

Bien que les cuvettes oasiennes de grande taille ne soient pas nombreuses, celles qui ont une superficie de plus de dix ha représentent plus de la moitié des superficies obtenues pour chaque méthode (figure 21).

L'analyse par objet est donc proche de la réalité terrain. La plupart des grandes cuvettes faussement détectées par la méthode pixellaire sont soit des édifices dunaires recouverts par une forte végétation, soit des grandes dépressions occupées par une steppe arborée composée d'*Acacia raddiana*.

L'analyse des cuvettes oasiennes du Département de Gouré d'après les caractéristiques hydrogéologiques a permis de les discriminer dans trois types de secteurs d'aquifères : les nappes discontinues du socle du Mounio, les nappes libres du Manga et les nappes libres des Koramas (figure 22 et tableau 8). Les cuvettes oasiennes sont plus concentrées dans les secteurs de nappes libres du Manga (3677) et celles des Koramas (5887).

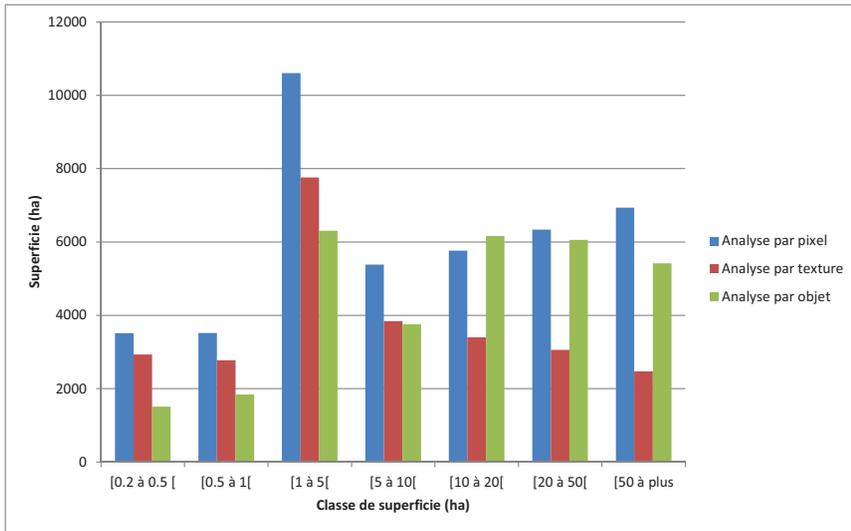


Figure 21 - Distribution des superficies totales par classes de taille des cuvettes oasiennes de la zone d'étude selon les trois méthodes d'analyse

Nos observations de terrain montrent que les cuvettes oasiennes du secteur à reliefs de socle exclusifs, au nombre de 1736, sont totalement différentes des «cuvettes» des deux autres secteurs, aussi bien par leurs dénivelés, leurs sols que leurs associations végétales et incidemment de leurs modes d'occupation.

Tableau 8 – Répartition du nombre et de la superficie des cuvettes oasiennes selon les trois types aquifères

	Nombre	Superficie (ha)
<b>Nappe libre du lac Tchad</b>	3677	13933
<b>Nappe discontinue du socle</b>	1736	5701
<b>Nappe libre des Koramas</b>	5887	12427

Bien que le nombre des cuvettes oasiennes du secteur des nappes libres des Koramas soit de loin plus important (5887), en superficie, elles sont inférieures (12427 ha) à celles du secteur des nappes libres du Manga (13933 ha).

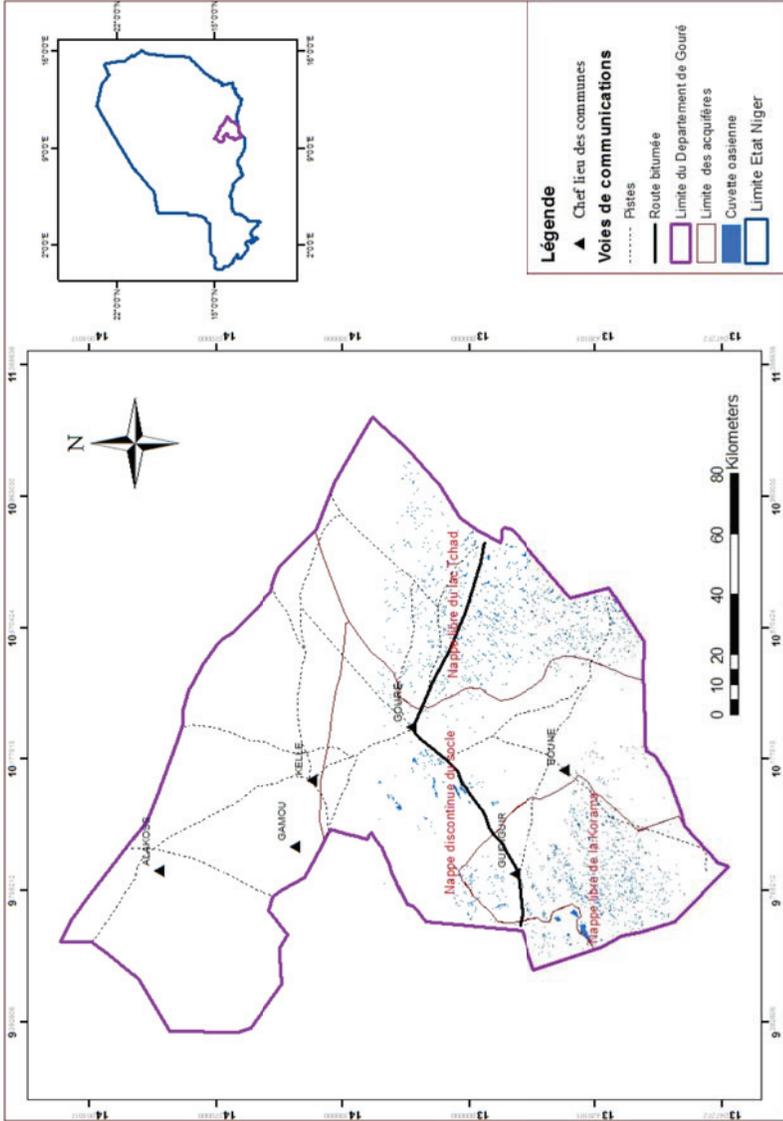


Figure 22 - Localisation des cuvettes oasiennes dans le Département de Gouré.

### II.2.3. Quelques limites de la méthode de classification par objet

La classification d'images par objet a néanmoins des limites. Ces limites sont évaluées à travers 14 cuvettes avec comme indicateur, l'erreur de détection des surfaces de cuvette ou marge d'erreur. La marge d'erreur varie de -28.5 à 30.7 %. On note des situations où l'analyse par objet surestime les superficies des cuvettes et des situations où les surfaces sont sous-estimées (tableau 9).

Tableau 9 - Marge d'erreur pour un niveau de confiance égale à 95 %

Cuvette	Surface obtenue par analyse par objet (ha)	Surface obtenue par le GPS (ha)	Marge d'erreur (%)
Abké	197.6	172.8	14.3
Balla	9.6	11.7	-18.2
Daguel	26.9	24.7	8.9
Dounia Koura	34	34.1	-0.3
Gachaké 1	20.3	18.7	8.9
Gachaké 2	17.1	15.4	10.7
Gassafa	286.2	251.5	13.8
Goginé	117.6	131.3	-10.4
Iskour	30.3	23.2	30.7
Kantou	45.5	43.7	4.1
Kilikina	40.9	39.3	4.0
N'Guelguidadé	33.9	32	5.8
N'Guiguidjé	17	16.5	3.5
Woro	7.3	10.3	-28.5

#### Surestimation de la surface des cuvettes

Plusieurs raisons peuvent expliquer la surestimation des surfaces des cuvettes par la méthode d'analyse d'image par objet. C'est le cas des surfaces des cuvettes ayant bénéficié d'appui des ONGs et Projets en grillage ou fils de fer

barbelé comme matériau de clôture. Cette clôture est érigée au-delà des limites de cuvette.

L'analyse d'images par objet considère les limites de la clôture comme celles de la cuvette (figure 23B). C'est le cas de la cuvette d'Abké (ME est égale à 14.4 %) et d'Iskour (ME est égale à 30.7 %). Dans certains cas, l'analyse par objet identifie les petits villages comme des cuvettes à cause des formes régulières et aussi la couverture végétale qui est relativement dense dans les villages.

À Gassafa et à Iskour, les limites du village ont été fusionnées aux limites des cuvettes respectives (figure 23). À Iskour, en plus des limites du village, deux petites cuvettes situées à moins de 15 m de la cuvette d'Iskour ont été considérées comme partie intégrante de la cuvette d'Iskour. C'est ce qui explique les surfaces importantes obtenues par la méthode d'analyse d'images par objet au niveau de ces cuvettes.

### **Sous-estimation de la surface des cuvettes**

Par contre au niveau des cuvettes où l'auréole externe est dégradée, l'analyse d'images par objet sous-estime les surfaces des cuvettes. Ces cuvettes, situées généralement au nord de la zone d'étude et représentées ici par les cuvettes de Woro (ME est égale à -28.5 %), de Balla (ME est égale à -18.2 %) et de Goguiné (ME est égale à -13.7 %), sont à eau profonde (figure 24). La détermination des limites de ces cuvettes cause des problèmes même par interprétation visuelle d'images, leurs délimitations nécessitent une très bonne connaissance du terrain. La surface de la cuvette de Woro a été sous-estimée parce que l'analyse d'images par objet a divisé la cuvette en deux (figure 24 B).

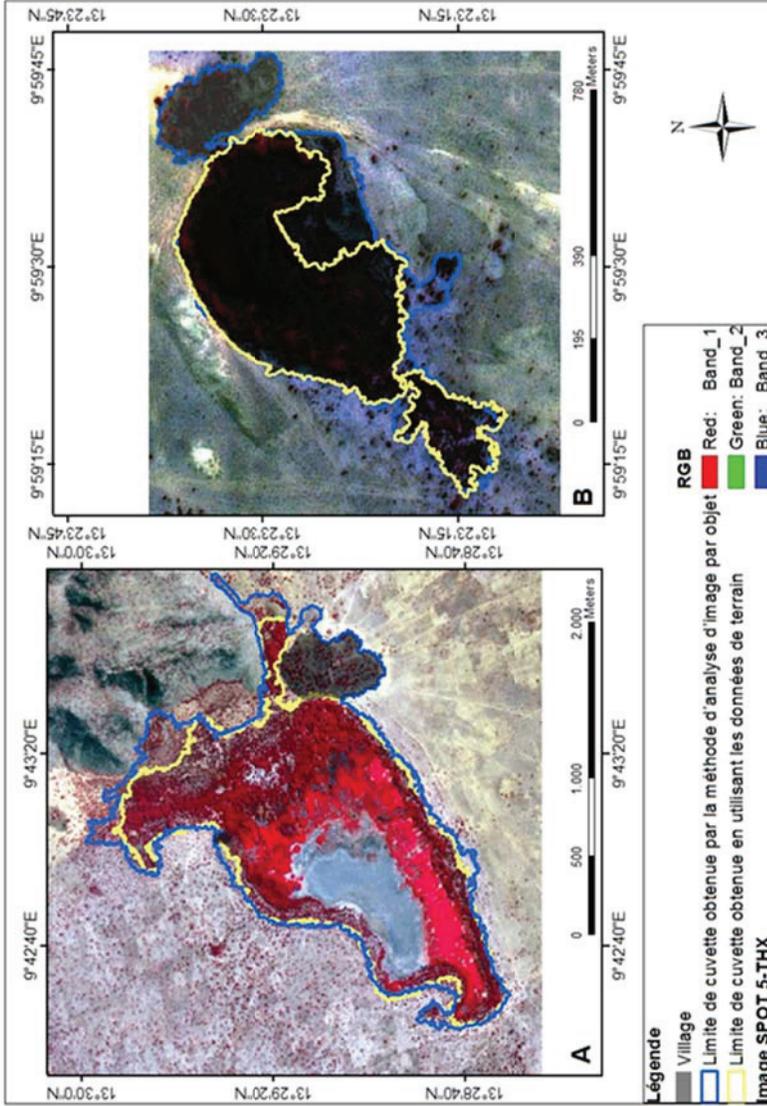


Figure 23 - Comparaison des formes des cuvettes de Gassafa et d'Iskour restituées par l'analyse d'objet d'image et les formes réelles

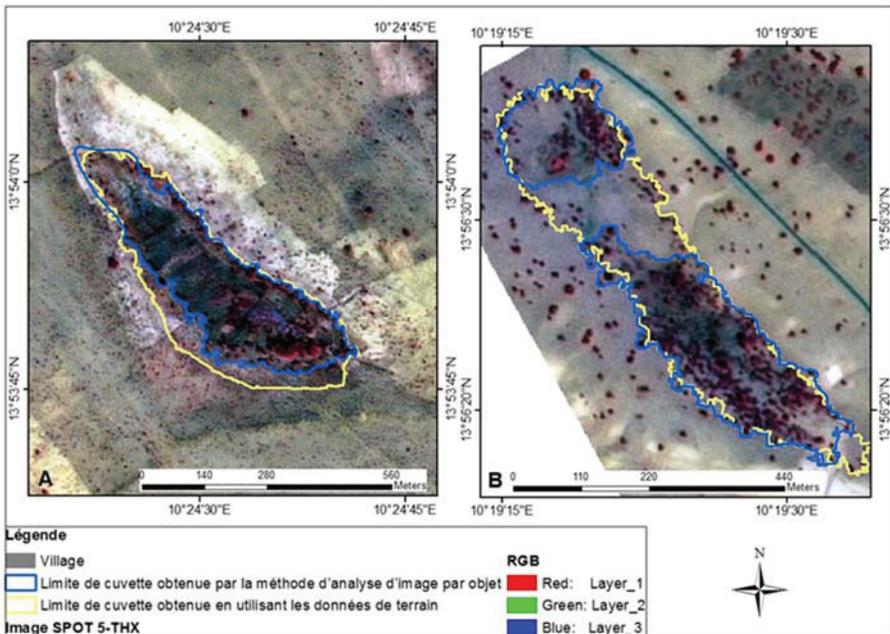


Figure 24 - Comparaison des formes des cuvettes de Balla et de Woro restituées par l'analyse d'objet d'image et les formes réelles

L'analyse d'images par objet présente un biais puisque la marge d'erreur moyenne sur les 14 cuvettes est de 3.4 %. On note une tendance de la méthode à surestimer la surface des cuvettes. L'écart type des erreurs qui traduit la dispersion des surfaces autour de la moyenne, est relativement importante (14.6 %). En considérant que cette dispersion suit une loi normale, la marge d'erreur de l'analyse par objet à 95 % de confiance est estimée par deux fois l'écart type divisée par la racine carrée du nombre de cuvettes. D'où une erreur de détection de cuvette à 95 % de probabilité dans l'intervalle de confiance de  $\pm 7.8 \%$ , soit l'intervalle  $[-4.4 ; 11.2 \%$ ].

### Conclusion partielle

Les performances des trois (3) méthodes de classification d'image (approche par pixel, par analyse de la texture et par analyse par objet) ont été comparées afin de faire l'inventaire des cuvettes oasiennes du Département de Gouré. 11300 cuvettes oasiennes ont été détectées par l'analyse par objet. Les résultats ont montré une pertinence incontestablement supérieure de l'analyse par objet par rapport aux deux autres méthodes. Ces résultats corroborent

plusieurs études (Willhauck, 2000 ; Cleve *et al.*, 2008; Duro *et al.*, 2012; Wellens, 2014). Cette évaluation des méthodes a révélé des limites certaines de l'analyse pixellaire à détecter des cuvettes oasiennes. Une des contributions de cette étude est un inventaire exhaustif des cuvettes oasiennes dans cette zone. Elle montre aussi que ces cuvettes oasiennes contiennent des unités paysagères ayant des similarités marquées du point de vue de la télédétection avec celles des vallées sèches, des édifices dunaires et des collines. Ceci explique les confusions constatées entre les classes surtout au niveau de l'analyse pixellaire.

Malgré le niveau des marges d'erreur dans l'estimation des surfaces des cuvettes, il faut noter que la méthode d'analyse d'images par objet permet quand même de localiser au mieux les cuvettes de la zone d'étude. C'est donc un outil d'aide à la décision précieux. Cependant pour des études plus détaillées, notamment celles qui concerneraient une estimation de l'évolution des surfaces des cuvettes entre deux périodes d'observation, une correction de ces limites par analyse et interprétation visuelle des images apparaît nécessaire. Les fichiers vectoriels de forme élaborés par l'analyse par objet feront gagner un temps précieux aux photointerpréteurs car ils constitueront la plupart du temps une très bonne base au fichier de forme final qui sera délimité par la photointerprétation des images.

Enfin, il convient de noter qu'un modèle numérique de terrain à maille fine (<10m) aurait certainement pu servir à mieux délimiter les bords de cuvettes. Malheureusement il n'existe pas pour la zone en question. C'est clairement vers ce genre d'association d'images satellite à très haute résolution avec une topographie détaillée de la zone qu'il faut tendre pour faire progresser la méthode de reconnaissance automatique des zones de cuvettes.

Dans le Chapitre III suivant, la caractérisation des cuvettes ainsi identifiées est engagée à travers une analyse de leurs formes et de leurs orientations

# CHAPITRE III. CONTRIBUTION DE L'ANALYSE MORPHOLOGIQUE A L'ETUDE DES PROCESSUS DE FORMATION DES CUVETTES OASIENNES ET DE LEUR DYNAMIQUE

## Introduction

Les cuvettes oasiennes du Département de Gouré, parfois cultivées intensivement, constituent des refuges pour la vie en raison de la concentration relative de leurs différentes composantes : eau, sol, végétation, microorganismes, animaux et hommes (Ben Salah, 2002). Malheureusement, ces cuvettes sont menacées d'ensablement, conduisant à leur disparition progressive (SAA/Gouré, 2000; PLECO, 2006 ; Tidjani *et al.*, 2009a,b ; Bodart *et al.*, 2010 ; Kanembou et Karimoune, 2013).

C'est pour mieux comprendre les processus d'ensablement qu'est initiée cette étude de la morphologie et de l'orientation des cuvettes oasiennes. Cette étude combine l'indice de forme de Gravelius, la dimension fractale et l'orientation générale des cuvettes pour faire le lien avec les processus de mobilisations éoliennes autour des cuvettes oasiennes.

Les indices morphologiques sont utilisés pour caractériser les bassins versants (Musy et Higy, 2004). Ils ont été créés et utilisés pour la première fois par les géomorphologues afin d'expliquer en quoi la forme d'un bassin versant (allongement, compacité, circularité) influence le régime des cours d'eau. Par analogie, ces indices sont utilisés ici pour déterminer la forme des cuvettes oasiennes. Les cuvettes sont des dépressions fermées où l'écoulement est endoréique. L'endoréisme est une dynamique particulière de bassin versant dans laquelle le réseau n'est relié à aucun autre. Les écoulements sont concentrés en un point bas du bassin, soit sous forme de mare, soit par accumulation souterraine (Roche, 1963). Cet endoréisme peut avoir des causes anciennes et récentes (Courel, 1984). Le réseau hydrographique avait été fortement oblitéré au moment de la mise en place des dunes formant les ergs. Les apports éoliens à la base de la création des édifices dunaires accentuent l'endoréisme, en oblitérant le réseau hydrographique. C'est ce qui est à l'origine de nombreuses cuvettes oasiennes dans le Département de Gouré.

La dimension fractale notée  $D$  est aussi un indice morphologique qui renseigne en plus de la forme sur le taux de lissage des contours des cuvettes (Hauchard *et al.*, 2002). La dimension fractale a été utilisée dans plusieurs études en écologie du paysage pour caractériser le degré d'anthropisation des paysages (Imre et Bogaert, 2004; Bamba, 2010; Mama *et al.*, 2013). Selon ces auteurs, les paysages anthropisés sont généralement ceux qui ont des contours réguliers, façonnés par l'Homme, et les paysages non anthropisés sont le plus souvent caractérisés par des contours très irréguliers, donc n'ayant pas subi l'action de l'Homme. Dans le Département de Gouré, les paysages de cuvettes sont plus soumis à la dynamique de l'ensablement (donc l'action éolienne) qu'aux actions de l'Homme en raison notamment de la faible densité de la population (Kanembou et Karimoune, 2013). La densité moyenne est de 3,2 habitants au km<sup>2</sup> (INS, 2010).

La géométrie fractale décrit les formes complexes et les processus non linéaires (Mandelbrot, 1984). La complexité des formes des objets naturels résulte généralement de processus simples, souvent récursifs (Frankhauser, 1990 et 1997; Imre et Bogaert, 2004; Roland et Fleurant, 2004; Bamba, 2010 ; Paszto *et al.*, 2011; Mama *et al.*, 2013). La caractéristique la plus importante d'un objet fractal est le motif qui se répète sur une échelle. Un objet fractal a une dimension  $D$  fractionnée, nombre réel, qui est proche de 1 quand la fractale est "plutôt" lisse, et qui augmente quand la fractale devient plus accidentée. Ce nombre tend vers 2 quand la fractale remplit la portion de plan qui lui sert de support. Les fractales ont donc une dimension comprise entre 1 et 2 pour le plan, entre 2 et 3 pour les volumes. Elles servent à quantifier le degré d'irrégularité et de fragmentation d'un ensemble géométrique ou naturel. Les effets généralement associés à la notion de fragmentation dérivée des valeurs de la dimension fractale des objets sont (Andrèn, 1994; Nikolakaki, 2004) : la perte d'habitat associée, la diminution de la taille des objets, l'augmentation de l'effet de bordure et l'augmentation de leur isolement.

L'étude de l'orientation des cuvettes est quant à elle très intéressante dans une zone où le processus de désertification amplifié par les activités humaines (déboisement excessif, surpâturage, extension des terres de cultures) s'est traduit par la dégradation du maigre couvert végétal et par une augmentation

de la vitesse des vents (Tidjani *et al.*, 2009a), conditions favorables à la remise en mouvement des dunes (Bodart et Ozer, 2009; Bodart *et al.*, 2010). Elle permet de comparer les orientations des cuvettes à celles des vents. Plusieurs études établissent des relations entre la morphologie et l'orientation des édifices dunaires et la direction des vents (Aufrère, 1934; Capot-Rey, 1970; Mainguet, 1975; Mainguet et Callot, 1978; Mainguet *et al.*, 1985; Pion *et al.*, 1990 ; Karimoune et Ozer, 1994). Mais aucune ne s'est concentrée spécifiquement sur la morphologie et l'orientation des cuvettes qui sont en interaction étroite avec celles des dunes.

En préliminaire de cette étude, deux questions de recherche sont formulées. Comment la morphologie des cuvettes éclaire-t-elle leurs morphodynamiques ? La dynamique actuelle des cuvettes est dominée par l'ensablement qui a comme conséquence principale leur comblement. L'ensablement des cuvettes se fait-il selon des axes très dépendants de la direction des vents dominants actuels ? De façon plus détaillée, comment l'étude morphométrique des cuvettes permet-elle de comprendre les processus de dégradation des cuvettes sous la dynamique éolienne? Dans le Département, on remarque une progression des foyers de remobilisation de sable autour des cuvettes oasiennes. Il y a plusieurs hypothèses possibles à l'apparition de sable vif dans le Département de Gouré : ensablement par les vents, dégradation de la végétation, piétinement par le bétail dans les zones d'accès à la cuvette, ... Ces derniers constituent les principaux facteurs de dégradation des cuvettes oasiennes dans le Département de Gouré. Cette dégradation peut-elle modifier les contours des cuvettes oasiennes ? Ou bien lorsque les contours d'une cuvette sont réguliers, peut-on dire que la cuvette a été très lissée par le vent ?

### **III.1. METHODOLOGIE**

Les résultats sur l'identification des cuvettes oasiennes obtenues par analyse par objet ont été utilisés. Les données collectées sur des cartes topographiques au 1/200000 de la zone (IGN, 1962) et géomorphologiques (Pirard, 1966 ; Karimoune, 1994) ont été intégrées et superposées avec la couche des cuvettes oasiennes identifiées afin de relever et de corriger les erreurs d'identification constatées de l'analyse visuelle d'images SPOT 5-

THX acquises en 2013. Après corrections cartographiques, on dénombre 10717 cuvettes oasiennes couvrant 334.75 km<sup>2</sup> dans le Département de Gouré.

### **III.1.1. Matériels**

Deux logiciels de système d'information géographique ont été utilisés : Arc GIS et WhiteboxGAT. Sur Arc GIS, l'extension Patch Analyst 5 a été utilisée pour calculer l'indice de compacité de Gravelius et la dimension fractale. Cet outil permet de faire une analyse spatiale des unités de paysage et une modélisation des attributs associés à ces unités. WhiteboxGAT développé par Lindsay (2010 et 2014) a servi à calculer l'orientation des cuvettes oasiennes.

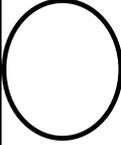
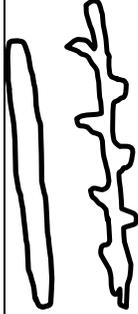
### **III.1.2. Détermination des paramètres**

#### ***III.1.2.1. L'indice de forme de Gravelius***

Les cuvettes oasiennes étudiées ont été comparées à un bassin de forme standard (bassin circulaire) à travers l'indice de forme de Gravelius ou coefficient de compacité de Gravelius (équation I). Il est défini comme le rapport du périmètre de la cuvette à celui d'un cercle de même surface (Roche, 1963; Bendjoudi et Hubert, 2002; Musy et Higy, 2004). Soit P le périmètre d'une cuvette oasienne et A sa surface ; le coefficient de compacité de Gravelius s'exprime par:

$$K = \frac{P}{2\sqrt{\pi A}} = 0.28 \frac{P}{\sqrt{A}} \text{ (Équation I)}$$

Tableau 10 - Classes de formes de cuvette oasienne suivant les valeurs d'indice de Gravelius

Forme	Indice de Gravelius	Définition	Schéma stylisé
<b>Circulaire</b>	1 à 1.03	Cuvettes ayant la forme de cercle	
<b>Ovoïde</b>	1.03 à 1.3	Cuvettes ovoïdes	
<b>Amiboïde</b>	1.3 à 1.4	Cuvettes caractérisées par une association de plages irrégulières, lobées, d'aspect amiboïde, à contours nets, très contrastés	
<b>Étirée</b>	1.4 à 1.7	Cuvettes allongées	
<b>Très étirée à amiboïde</b>	> 1.7	Cuvettes plus étirées que les précédentes. Elles présentent souvent des fragments amiboïdes c'est-à-dire des contours lobés	

Cinq (5) valeurs de (K) ont été retenues (tableau 10) afin de définir des classes de compacité ou de forme. La méthode de calcul des quantiles qui utilise l'algorithme de Jenks (1963) a servi à déterminer les valeurs-seuil de l'indice de forme de Gravelius. C'est une méthode de détermination des ruptures naturelles jugée statistiquement très robuste. Elle minimise les variances intra-classes et maximise les variances inter-classes.

L'indice de forme de Gravelius a été utilisé dans cette étude pour caractériser la forme des cuvettes oasiennes car c'est un indicateur de leur circularité (Bendjoudi et Hubert, 2002; Musy et Higy, 2004).

### ***III.1.2.2. L'orientation des cuvettes oasiennes***

L'outil Long Axis du logiciel WhiteboxGAT a été utilisé pour déterminer l'orientation des cuvettes oasiennes. Cet outil permet de déterminer automatiquement le plus grand axe d'un polygone d'une part et de récupérer leurs orientations générales par rapport au nord d'autre part (Lindsay, 2010 et 2014). Le fichier de forme contenant les polygones des cuvettes oasiennes a été utilisé comme input dans WhiteboxGAT. La valeur de l'orientation est exprimée comme un angle compris entre 0 et 180° dans le sens horaire à partir du nord. Pour une visualisation efficace, une reclassification des valeurs d'orientation à travers la rose des vents a été faite.

L'orientation des cuvettes a été comparée à celle du réseau hydrographique. Le réseau hydrographique a été généré à partir d'un modèle numérique de terrain. Il s'agit du modèle ASTER GDEM v2 (Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer) qui a un pas au sol d'un arc-seconde (environ 30 m à l'équateur). Quatre scènes acquises en septembre 2013 ont été mosaïquées. L'extraction du réseau hydrographique à partir du MNT ASTER GDEM v2 passe par trois étapes successives. D'abord les directions d'écoulement sont calculées, ensuite les flux d'accumulation et enfin le réseau hydrographique a été généré.

### ***III.1.2.3. La dimension fractale***

Dans un paysage, la forme et le contour des objets sont contraints par des processus écologiques différents et ainsi peuvent être distingués par leur dimension fractale. La dimension fractale notée  $D$  est un paramètre de base d'un fractal qui révèle les aspects importants de sa structure et mesure le degré

d'irrégularité ou fragmentation d'un objet (Frankhauser, 1990; Imre et Bogaert, 2004; Bamba, 2010; Paszto *et al.*, 2011).

La méthode de calcul surface-périmètre d'estimation de la dimension fractale a été utilisée (équation II). Elle a l'avantage d'être intégrée dans les SIG à travers l'extension Patch Analyst 5 d'Arcgis. Elle a permis de calculer les valeurs de la dimension fractale de l'ensemble des cuvettes oasiennes. Cette méthode a été choisie parce qu'elle est la plus pratique lorsque la taille de l'échantillon est grande comme ici où 10717 cuvettes oasiennes ont été dénombrées.

Cette dimension se calcule par la formule:

$$P = k\sqrt{A}^D \text{ (Équation II)}$$

où k est le facteur de graduation aussi appelé « préfacteur » (Halley *et al.*, 2004) reliant A à P, supposé constant et reflétant les formes de taches. P (en m) = périmètre; A (en m<sup>2</sup>) = superficie, D= dimension fractale.

Pour calculer D à partir de l'équation II, l'extension Patch Analyst 5 d'Arcgis utilise une transformation logarithmique linéaire (Halley *et al.*, 2004) pour simplifier l'équation II (équation III). La régression logarithmique linéaire entre les variables explicatives logi et logA permet de calculer D considérée comme étant le double de la pente de la courbe entre ces deux variables et log(k) la valeur de l'ordonnée à l'origine. La régression devra être significative.

$$\log P = \log k + \left(\frac{D}{2}\right) \cdot \log A \text{ (équation III)}$$

La dimension fractale traduit ici la complexité des contours d'une cuvette. Ainsi, plus les tracés des limites des unités des paysage sont complexes en segments c'est-à-dire moins elles sont lissées plus la dimension fractale est grande (Andrèn, 1994 ; Nikolakaki, 2004 ; Imre et Bogaert, 2004 ; Roland et Fleurant, 2004; Mama *et al.*, 2013). Quand la complexité en segments est moindre alors on est plutôt en présence de paysages à limites lissées, ce qui se traduit par une dimension fractale faible. Par analogie au degré d'anthropisation des paysages étudiés dans des environnements différents (Imre et Bogaert, 2004; Bamba, 2010; Mama *et al.*, 2013), dans notre contexte, la complexité des contours des cuvettes sera interprétées en fonction du taux d'ensablement des cuvettes. C'est pourquoi, une relation entre le taux

d'ensablement des cuvettes et l'indice fractal est d'abord établi. Des valeurs-seuil de dimension fractale des cuvettes oasiennes ont été aussi déterminées par l'algorithme de Jenks (1963).

Pour voir le lien entre l'indice fractal et un certain facteur qui pourrait agir sur le lissage des bordures des cuvettes, en particulier l'érosion éolienne (ensablement), la dégradation des sols et la végétation, une analyse visuelle sur 120 cuvettes oasiennes choisies de façon aléatoire sur les images SPOT 5-THX a été effectuée. Les critères d'appréciation retenus dans ce cadre sont les surfaces de dune vive dans une zone tampon de 200 m de largeur autour des cuvettes ainsi que celles des cultures pluviales.

Le risque d'ensablement est obtenu en faisant le rapport en pourcentage entre la somme des surfaces de dune vive et de culture pluviale dans une zone tampon de 200 m de largeur autour de la cuvette divisée par la surface totale de la zone tampon. Ce risque varie de nul à très élevé (75 et 100 %) en passant successivement par un risque faible (0 - 25 %), moyen (25 - 50 %) et élevé (50 - 75 %).

Les indices de taille, de forme et d'orientation ont été utilisés comme critère de différenciation des différents types de cuvettes. Cette différenciation permet de faire une classification préliminaire de différents groupes et d'appliquer l'indice fractal sur ces groupes pour détailler davantage le lien entre le lissage et l'indice fractal. Pour faciliter l'analyse, les cuvettes ont été regroupées par classes plus réduites en fonction de la taille, de la forme et l'orientation :

- trois classes de taille ont été retenues : petites (0.2 – 1 ha), moyenne (1 – 5 ha) et grande (supérieure à 5 ha) ;
- les cinq classes de forme élaborées dans le tableau 10 ont été réduites à trois : arrondie (circulaire plus ovoïde), amiboïde et allongée (étirée plus étiré à amiboïde) ;
- les quatre classes d'orientation de cuvette ont été groupées en deux classes : N – S (N – S plus NO – SE) et E – W (E – W plus NE – SO).

Le regroupement des trois (3) indices fractals avec les trois (3) indices de taille, les trois (3) indices de forme (3) et les deux indices (2) d'orientation fait 54 sous classes théoriques potentielles mobilisant le critère indice fractal.

## III.2. RESULTATS ET DISCUSSION

### III.2.1. Indice de forme de Gravelius des cuvettes oasiennes

La répartition des cuvettes oasiennes selon l'indice de forme de Gravelius a permis leur classification en cinq (5) formes (tableaux 10 et 11). La première possède un indice de compacité compris entre 1 à 1.03. Elles correspondent à des cuvettes de forme circulaire. Au nombre de 915, elles représentent 8.5% de l'ensemble des cuvettes et 1.8 % de leur superficie totale. Ce sont dans la majorité des petites cuvettes (<0.7 ha).

Les cuvettes oasiennes ovoïdes représentatives de la deuxième classe de forme constituent 47% du nombre total des cuvettes. Leur superficie totale est de 6295 ha. Elles sont surtout constituées par les cuvettes de petite taille comme en témoigne leur valeur minimale (0.2 ha), maximale (59 ha) et moyenne (1.3 ha).

Les cuvettes amiboïdes sont au nombre de 1173 soit 10.7% de l'ensemble des cuvettes du Département de Gouré. Elles couvrent une superficie de 3034 ha. Leur indice de forme varie de 1.3 à 1.4. La superficie moyenne de cette classe de cuvette est de 2.7 ha. Les cuvettes amiboïdes observées sur le terrain et par analyse visuelle d'images SPOT 5-THX ayant une superficie inférieure à 0.5 ha sont plutôt de forme étirée. L'origine des formes amiboïdes est liée à des situations où les cuvettes sont situées entre des édifices dunaires transversaux et longitudinaux associées souvent à des reliefs résiduels.

La quatrième forme de cuvette présente un indice de forme compris entre 1.4 à 1.7. Ce sont des cuvettes de forme étirée qui représentent 17.6% de l'effectif total des cuvettes. Elles sont donc plus nombreuses que les amiboïdes et occupent plus de superficie. La taille maximale de ces cuvettes est de 110 ha.

*Tableau 11* - Nombre et superficie minimale, moyenne, maximale et totale des classes de cuvettes oasiennes obtenues suivant l'indice de Gravelius

<b>Forme</b>	<b>Indice de Gravelius</b>	<b>Nombre de cuvettes</b>	<b>Superficie minimale (ha)</b>	<b>Superficie maximale (ha)</b>	<b>Superficie moyenne (ha)</b>	<b>Superficie totale (ha)</b>
Circulaire	1 - 1.03	915	0.2	10	0.7	598
Ovoïde	1.03 - 1.3	5017	0.2	59	1.3	6295
Amiboïde	1.3 - 1.4	1173	0.2	202	2.7	3034
Étirée	1.4 - 1.7	1884	0.2	110	3.7	6865
Très étirée à amiboïde	>1.7	1728	0.2	862	9.7	16658

La cinquième forme de cuvettes possède un indice de compacité supérieur à 1.7. Ces cuvettes au nombre de 1728, sont plus étirées et sont moins nombreuses (16.1 %) que celles étirées. Leur forme est très étirée ou bien très étirée à amiboïde. Ces cuvettes, en raison de leur taille moyenne plus grande que les autres, seraient probablement situées dans le prolongement du réseau hydrographique (figure 25). La répartition des superficies des cuvettes très étirées montre que celles qui ont une superficie comprise entre 5 et 10 ha et de plus de 10 ha représentent respectivement 17 et 27 % de l'effectif total (figure 26). La plus grande cuvette de la zone appartient à ce groupe et occupe 862 ha. Les cuvettes ayant une superficie inférieure à 0.5 ha représentent 7.6 % de l'effectif des cuvettes de ce groupe.

Selon Karimoune *et al.* (1990), les cuvettes étirées et très étirées auraient deux origines :

- elles peuvent être liées à la vigueur des systèmes dunaires transversaux. Ce sont les formes les plus répandues dans le secteur d'étude. Ces cuvettes collectent en saison des pluies les eaux de ruissellement qui se transforment en mares temporaires où permanentes. Elles sont localisées de façon quasi exclusive dans la partie orientale où leur coalescence donne naissance à de véritables chenaux.
- elles peuvent être liées au résultat de l'oblitération du réseau hydrographique par des dunes longitudinales (Courel, 1984). Dans ce dernier cas, les cuvettes sont plus grandes (plusieurs dizaines d'hectares) et plus étirées. Ces cuvettes se sont formées entre des reliefs de quartzite et des dunes longitudinales. Elles sont peu nombreuses et se localisent uniquement au SW de la zone d'étude, notamment le secteur de Gassafa (figure 25).



La classe de taille dominante (0.2 à 0.5 ha) dans les cuvettes circulaires et ovales peut s'expliquer par une désorganisation poussée du réseau hydrographique autrement dit à un stade poussé des effets de l'activité éolienne. Ceci a, comme conséquence, la subdivision de grandes cuvettes ou des sous-bassins versants en plusieurs réseaux de drainage déconnectés les uns des autres (Courel, 1984; Desconnets, 1994). Les formes étirées renvoient aux formes du réseau hydrographique initial (Courel, 1984). En effet, dans la zone, l'efficacité éolienne est suffisante pour marquer les paysages par une fréquence spatiale marquée d'ergs. L'action éolienne est à la base de l'oblitération du réseau hydrographique en créant des cuvettes oasiennes de formes variées selon l'axe directionnel et le volume de sable en déplacement.

La répartition des cuvettes selon la superficie montre une forte variabilité de la taille moyenne suivant leur forme (figure 26). Cette moyenne varie en fonction de la valeur de l'indice de compacité. Plus cet indice est grand, plus la taille moyenne du groupe de cuvettes augmente et plus le nombre de cuvettes diminue. La plupart des cuvettes oasiennes de taille inférieure ou égale 0.5 ha ont un indice de compacité inférieur à 1.3.

La figure 26 confirme que les cuvettes circulaires et ovoïdes sont surtout de petite taille. En effet, 70 % ont une superficie inférieure à 1 ha et 20 % entre 1 et 5 ha. On observe, sur un effectif de 5613 cuvettes de superficie unitaire inférieure ou égale à 1 ha, que seulement 7.2 et 2.3% sont respectivement de forme étirée et très étirée. Ce qui confirme que la plupart des cuvettes étirées et très étirées sont généralement de grande taille. En effet, les cuvettes étirées et très étirées ayant une forte valeur d'indice de compacité occupent une superficie plus importante que les autres. La taille pour les cuvettes très étirées varie de 0.22 ha pour la minimale à 862 ha pour la maximale et une moyenne à 9.7 ha.

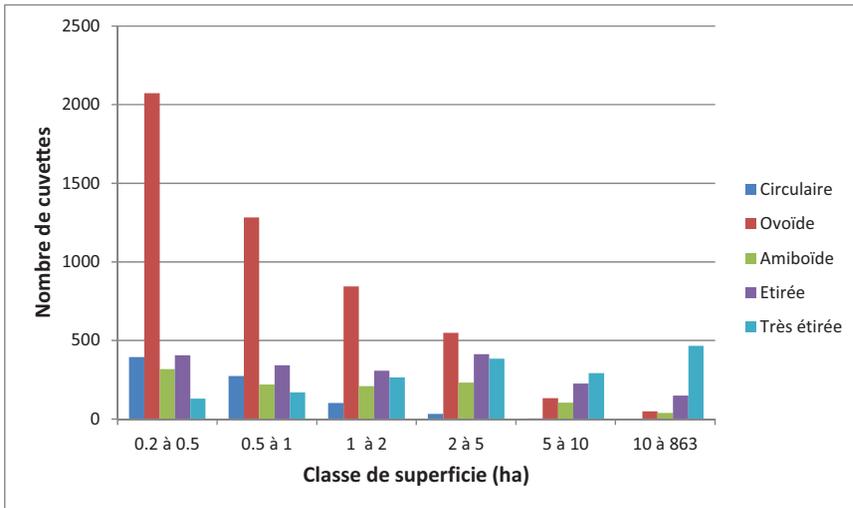


Figure 26 - Répartition de la taille des cuvettes oasiennes selon l'indice de forme de Gravelius

Les cuvettes sont plus concentrées au sud-ouest et au centre-ouest du Département de Gouré qu'au nord (figures 27 et 28). Au nord, elles sont étirées à très étirées, alors que plus on se dirige vers l'est, plus les cuvettes deviennent amiboïdes (figure 27C). Elles sont organisées sous forme de couloirs interdunaires (figure 27A et 28A) orientés NW-SE. Ces couloirs correspondent à des axes de drainage du réseau hydrographique autrefois fonctionnel (Karimoune, 1994).

Entre les couloirs jalonnés de cuvettes, on observe des axes d'interfluves. L'origine des cuvettes pourrait être liée à une perturbation du réseau hydrographique. Quant aux cuvettes de grande taille, elles seraient aussi sur des bras morts d'ordre supérieur du réseau hydrographique.

Bien que les trois plus grandes cuvettes de la zone soient situées au sud-ouest, les cuvettes oasiennes de l'est du Département ont en général une taille moyenne plus grande (figure 27B). Plus on va vers l'est, plus la taille moyenne des cuvettes augmente et la forme devient amiboïde. La disposition des cuvettes sur les axes du réseau hydrographique devient difficile à observer du fait de l'ensablement très poussé matérialisé par des étendues d'amas dunaires dans la partie orientale de la zone. À l'ouest, l'ensablement n'est pas aussi avancé mais est en cours.

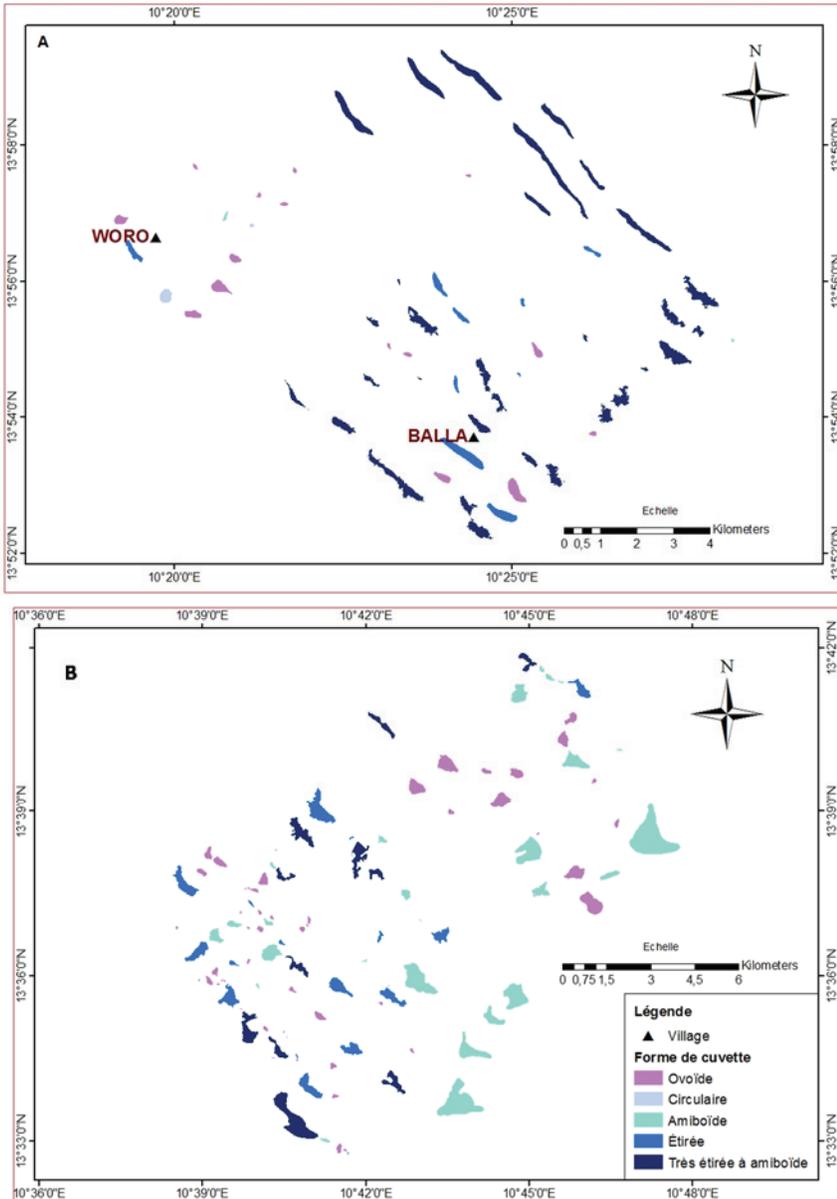


Figure 27 - Formes de cuvettes oasiennes obtenues selon l'indice de Gravelius dans le Département de Gouré : A (bande nord), B (bande est)

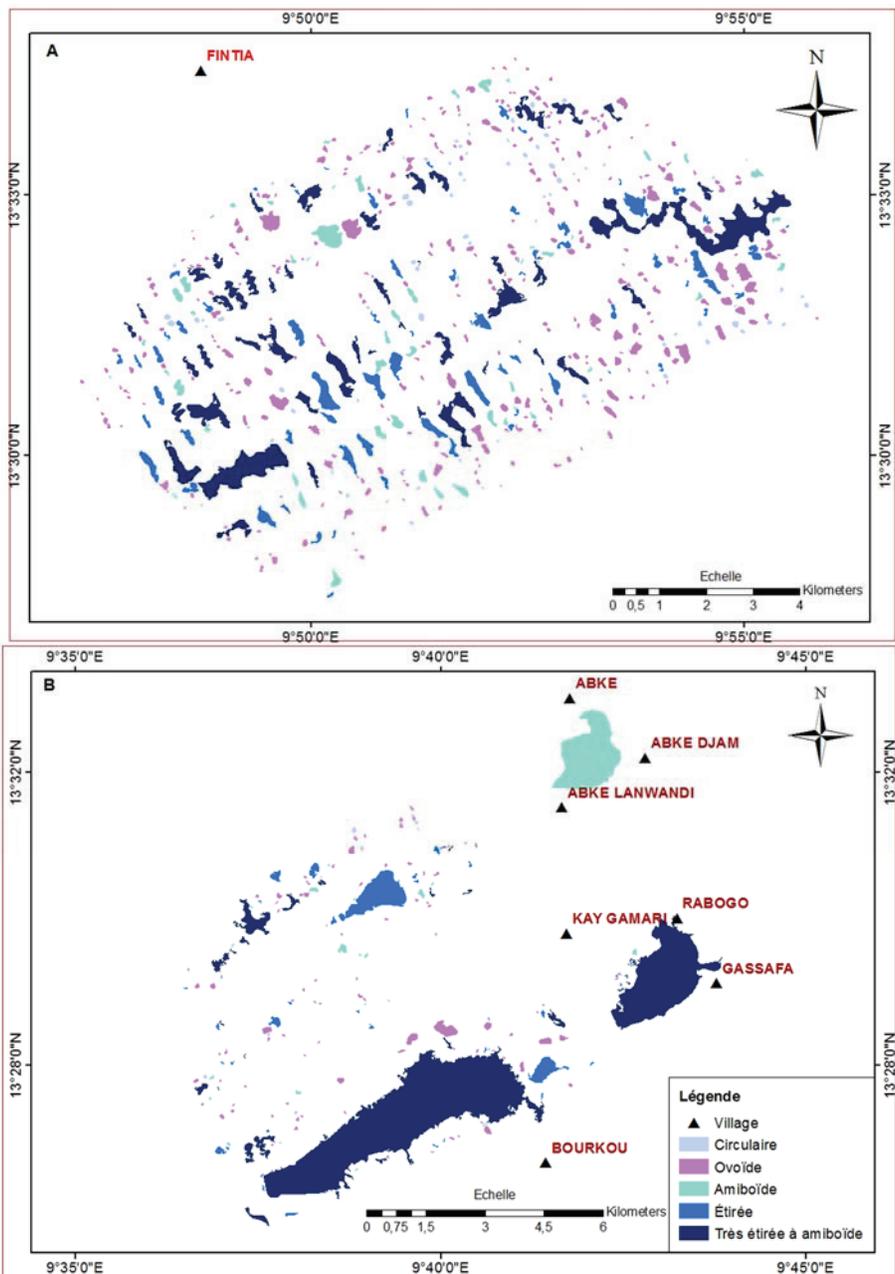


Figure 28 - Formes de cuvettes oasiennes obtenues selon l'indice de Gravelius dans le Département de Gouré : A (centre-ouest) et B (sud-ouest)

### III.2.2. Orientation générale des cuvettes oasiennes

La description de l'orientation des cuvettes oasiennes du Département de Gouré a été résumée à travers une rose de vent simplifiée à quatre directions (tableau 12 et figure 29) : nord-sud (N-S), nord-est - sud-ouest (NE- SW), est - ouest (E-W) et sud-est – nord-ouest (SE-NW).

Les cuvettes de direction SE- NW, sont disposées transversalement aux vents forts de la saison sèche (harmattan). Cette classe regroupe le plus grand nombre de cuvettes avec 34.3 % du total. Malgré leur effectif, la surface unitaire moyenne de ces cuvettes reste supérieure aux cuvettes orientées E-W et N-S. Ce qui permet d'affirmer que les cuvettes orientées NE-SW (surface unitaire moyenne est égale à 3.61 ha) sont constituées essentiellement de grandes cuvettes. Ensuite les cuvettes orientées E-W constituent une autre direction. Bien que la plus grande cuvette du Département appartienne à cette classe de direction, la taille unitaire moyenne (3.1 ha) de ces cuvettes n'est pas tellement la plus importante.

*Tableau 12* - Nombre et superficies minimale, moyenne, maximale et totale des classes de cuvettes oasiennes obtenues suivant quatre directions de la rose des vents

<b>Direction des cuvettes</b>	<b>Nombre de cuvettes</b>	<b>Superficie minimale (ha)</b>	<b>Superficie moyenne (ha)</b>	<b>Superficie maximale (ha)</b>	<b>Superficie totale (ha)</b>
E - W	2439	0.20	3.1	862	7319
N - S	2290	0.20	2.53	202	5898
NE - SW	2312	0.20	3.61	324	8458
SE - NW	3676	0.20	3.27	125	11775

Les cuvettes orientées N-S sont au nombre 2290 et occupent une aire totale inférieure par rapport aux autres directions. La direction NE-SW est représentée par des cuvettes dont la taille varie de 0.2 à 324 ha avec une moyenne unitaire de 3.61 ha. Cette direction NE-SW correspond à la direction des vents dominants d'harmattan.

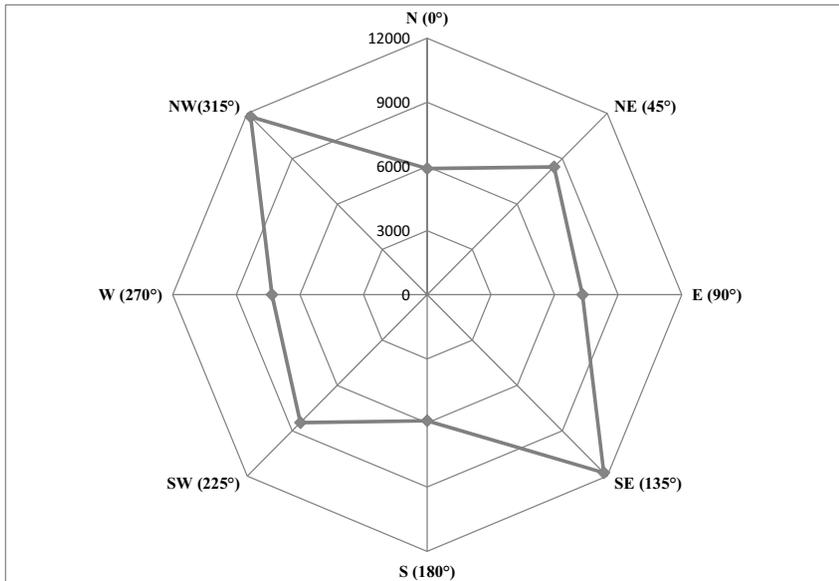


Figure 29 - Superficie totale en hectares des cuvettes oasiennes obtenues suivant les quatre directions de la rose des vents.

Légende - N : nord ; NE : nord-est ; E : est ; SE : sud-est ; S : sud ; SW : sud-ouest ; W : ouest ; NW : nord-ouest

La direction des cuvettes est influencée par le vent. A Gouré, les vents forts ( $\geq 6$  m/s) pouvant déclencher des processus d'érosion soufflent essentiellement du secteur E – NE. Ces vents secs sont chargés habituellement de poussières. Ils représentent 60% de la fréquence de la direction des vents à la station de Gouré en 1984 (Ozer *et al.*, 2004). Ces informations sont utiles pour comprendre les processus éoliens au niveau des différentes formations dunaires. Pour expliquer la morphologie et l'orientation de certaines dunes, il faut forcément faire appel à ces variabilités dans leur direction de déplacement (Lekouch *et al.*, 2010). Cette variabilité est la cause des collisions entre dunes qui engendrent parfois leur fractionnement et la création de nouvelles formes dunaires.

Notons aussi que dans les secteurs nord et sud-est de la zone d'étude, la direction des vents d'harmattan est perpendiculaire à celle des dunes transversales. Les dunes transversales sont constituées d'éléments orientés NW-SE dont la longueur n'excède pas 5 km et dont la largeur est généralement inférieure à 0.5 km. Selon Karimoune *et al.* (1990) et Karimoune et Ozer

(1994), ces dunes jointives dans le sens NW-SE déterminent des couloirs interdunaires plus ou moins longs, plus ou moins profonds. C'est dans ces couloirs interdunaires que se forment les cuvettes oasiennes. En saison des pluies, ces cuvettes recueillent l'eau de ruissellement donnant naissance à des mares temporaires. La coalescence de ces mares transforme certaines interdunes en véritables chenaux (Karimoune *et al.*, 1990). Ce qui permet de dire que l'orientation des cuvettes vers le nord et le nord-ouest est surtout déterminée par l'orientation des dunes transversales.

Quant aux cuvettes orientées vers l'ouest et le sud-ouest, elles sont conformes à la même direction que les dunes longitudinales.

Les affleurements rocheux interviennent aussi parfois dans la localisation et l'orientation de cuvettes dans le cas où celles-ci sont situées dans les secteurs de relief du socle associés aux dunes longitudinales. Les dunes longitudinales associées à des reliefs résiduels barrent le réseau hydrographique et entraînent ainsi la création de mares temporaires sur leurs flancs (Karimoune, 1994).

Karimoune *et al.* (1990) et Karimoune (1994) ont essayé d'expliquer l'influence du réseau hydrographique sur les reliefs résiduels et les systèmes dunaires. Selon leurs résultats les reliefs résiduels et les édifices dunaires présentent deux orientations préférentielles NE-SW et NNW-SSE qui sont aussi celles du réseau hydrographique. Cette concordance de direction permet d'affirmer que les cuvettes oasiennes ont été façonnées suite à la mise en place d'édifices dunaires qui ont fractionné et dégradé le réseau hydrographique devenu aujourd'hui non fonctionnel.

La répartition de la taille des cuvettes selon leurs orientations montre une orientation des cuvettes dans toutes les directions (figure 30). Ceci pourrait s'expliquer par une mobilisation des sables dans toutes les directions et un accroissement de la fréquence des manifestations éoliennes qui se solde par des processus de déflation, d'érosion éolienne et de remaniements de sable de plus en plus intenses (Karimoune, 1994). Cependant, quelles que soient leurs tailles, les cuvettes transverses aux vents dominants d'harmattan sont numériquement plus nombreuses.

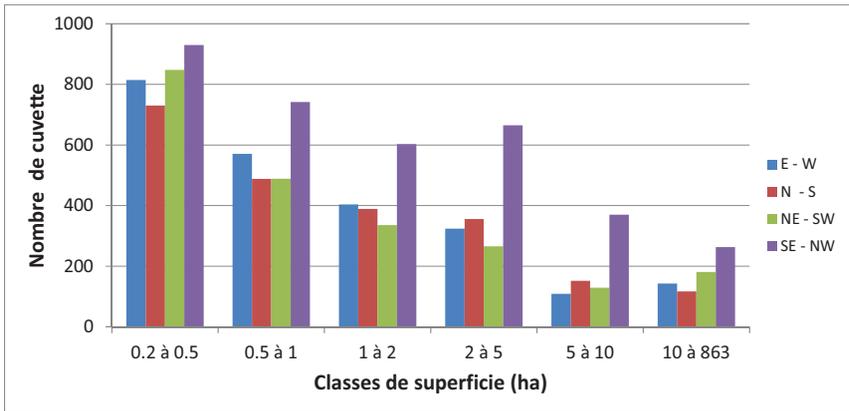


Figure 30 – Répartition du nombre de cuvettes par orientation principales et par classes de tailles.

Deux types de cuvettes se présentent en fonction de l’orientation du réseau hydrographique:

- les cuvettes ayant l’axe allongé sont dans la même direction que le réseau hydrographique. Elles sont situées en réalité sur ce réseau. Ces cuvettes sont généralement associées à des dunes longitudinales qui ont interféré avec les anciens cours d’eau (figures 31 et 32). Ces cuvettes se trouvent uniquement au SW de la zone d’étude ;
- les cuvettes ayant l’axe allongé perpendiculaire à la direction du réseau hydrographique. Ces cuvettes se trouvent à l’intérieur des dunes transversales (figure 31). Elles se localisent dans toute la zone d’étude et essentiellement au SE.

Les cuvettes orientées SE-NW se localisent dans toute la zone d’étude (figure 31) mais particulièrement dans le secteur NW de la zone (figure 32). Elles sont le plus souvent de taille relativement petite au sud de la zone (figure 31). Elles se situent essentiellement sur les tronçons de premier et deuxième ordre du réseau hydrographique.

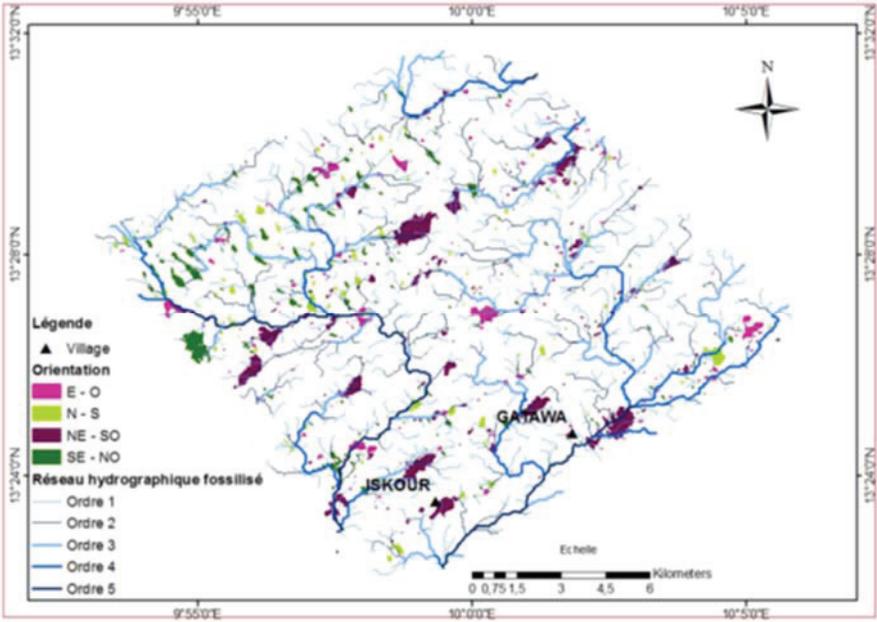


Figure 31 - Orientation des cuvettes oasiennes au sud du Département de Gouré.

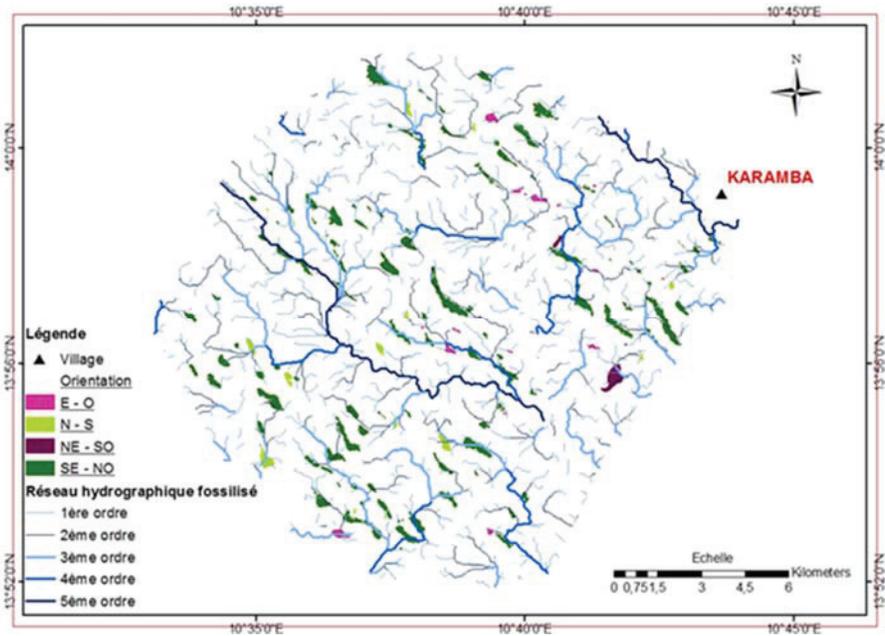


Figure 32 - Orientation des cuvettes oasiennes au nord du Département de Gouré.

Quant aux cuvettes orientées E-W et SW-NE, elles sont plus fréquentes au sud qu'au nord (figure 31). Elles sont en général de grande taille et ont la même orientation que le réseau hydrographique. Ces cuvettes orientées vers le sud-est correspondent préférentiellement à des tronçons d'ordres élevés du réseau hydrographique. Ceci pourrait expliquer leurs grandes tailles. C'est ce qui expliquerait aussi pourquoi la plupart de ces cuvettes accumulent des stocks importants d'eau ruisselée formant des mares durant la saison des pluies et une plage natronnée en saison sèche.

### **III.2.3. Dimension fractale des cuvettes oasiennes**

Les cuvettes oasiennes du Département de Gouré présentent de faibles valeurs d'indice fractal (inférieur à 1.4) à plus de 80 % (tableau 13). Les formes correspondantes aux différentes valeurs fractales ont été regroupées selon les trois (3) classes dans le tableau 13 :

- de 1.2 à 1.32 : ces cuvettes sont qualifiées de très lissées. Les contours de ces cuvettes sont réguliers et simples. La superficie totale de ces cuvettes est de 19333 ha.
- de 1.32 à 1.4 : ces cuvettes sont dites lissées. Ces cuvettes sont moins lissées par rapport aux précédentes. Cette catégorie regorge plus de cuvettes (50 % de l'ensemble) que les deux autres avec une taille unitaire moyenne de 2.35 ha. Malgré leur nombre plus élevé, les cuvettes lissées occupent au total moins de surface que celles très lissées. La superficie totale des cuvettes à contours lissés est de 12415 ha.
- de 1.4 à 1.59 : les cuvettes correspondantes possèdent des contours plus complexes que les précédentes. Elles sont classées en cuvette à contours lissés moyennement par le vent. Ces cuvettes représentent 10.2 % de l'ensemble des cuvettes de la zone. Elles sont en général plus petites que les cuvettes précédentes. Les cuvettes à contours moyennement lissés couvrent une superficie totale de 1705 ha.

*Tableau 13 - Nombre et superficie des classes fractales de cuvettes oasiennes*

<b>Contour</b>	<b>Dimension fractale</b>	<b>Nombre de cuvettes</b>	<b>Superficie minimale (ha)</b>	<b>Superficie moyenne (ha)</b>	<b>Superficie maximale (ha)</b>	<b>Superficie totale (ha)</b>
Très lissées	1.20 - 1.32	4230	0.30	4.68	862	19333
Lissées	1.32 - 1.40	5394	0.20	2.35	114	12415
Moyennement lissées	1.40 - 1.59	1093	0.20	1.6	38	1705

Dans cette étude, la morphologie des cuvettes à travers la dimension fractale a permis d'aborder la question de la dynamique des cuvettes. A ce sujet, la question principale dans cette zone est l'ensablement. Contrairement à l'ouest du pays où l'ensablement est lié surtout à l'érosion hydrique (Desconnets, 1994), dans le centre-est du Niger c'est l'érosion éolienne qui semble dominer dans le processus de l'ensablement. L'ensablement est actif surtout dans les axes des vents dominants. La régularité de ces vents détermine une certaine régularité des contours des cuvettes oasiennes. Ainsi, plus les masses de sables des édifices dunaires sont lissées par le vent, plus les contours des cuvettes deviennent réguliers.

Par ailleurs, la répartition des tailles des cuvettes selon les classes de dimension fractale montre que 34 % des cuvettes ayant une superficie inférieure à 1 ha appartient à la classe de cuvettes lissées (figure 33). 67 % des cuvettes moyennement lissées ont aussi une taille inférieure à 1 ha. Par contre les cuvettes de taille supérieure ou égale à 1 ha sont plus nombreuses dans le groupe de cuvettes à contours plus ou moins réguliers ( $D < 1.4$ ). La régularité des contours de ces cuvettes serait liée aux apports éoliens qui ont retracé les limites antérieures. Mais l'homme aussi contribue à modifier les limites des cuvettes oasiennes. En effet, il accélère l'action éolienne (par la mise en culture des terres dunaires autour des cuvettes, par le déboisement, par le surpâturage..) qui elle façonne les contours des cuvettes. Cependant, son action est négligeable devant l'ensablement qui domine la dynamique de cette zone (Tidjani *et al.*, 2009c ; Kanembou et Karimoune, 2013).

Pendant la saison sèche, les masses de sable sont transportées par les vents d'harmattan. Elles traversent les aires de transports et s'enrichissent en particules fines. Les vents de sable au cours de leur déplacement traversent les auréoles de végétation ceinturant les cuvettes. Ces dernières réduisent la vitesse du vent et provoquent le dépôt de sable sur les pourtours de dune.

Ces dépôts s'éboulent sur les versants qui se trouvent au vent des cuvettes et provoquent un recul de la cuvette au profit de la dune.

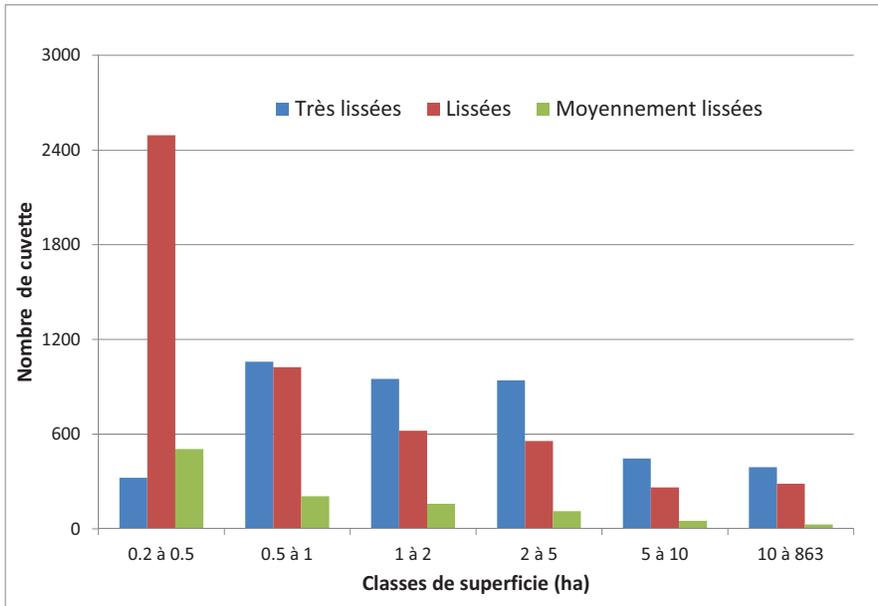


Figure 33 - Répartition des cuvettes oasiennes selon leur degré de lissage (classes de dimension fractale) et les classes de taille

Dans le détail, les limites des cuvettes sont plus lissées à l'est de Gouré (figure 34). Ceci est sans doute lié au fait que les phénomènes éoliens semblent être plus importants à mesure que l'on va vers l'est.

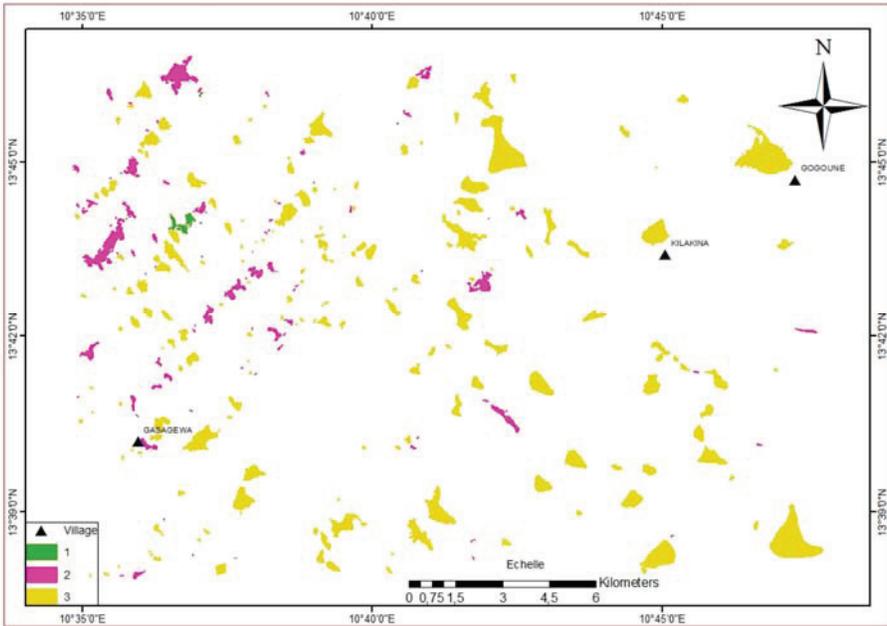


Figure 34 - Classes des formes des cuvettes oasiennes obtenues selon la dimension fractale à l'est du Département de Gouré.

Légende : Types de contours de cuvette- 1 : Moyennement lissées; 2 : lissées; 3 : Très lissées.

Une discrimination des classes d'indice fractal de cuvettes selon d'abord des critères de taille, puis de forme et enfin d'orientation effectuée dans la figure 35 a permis de comprendre davantage les corrélations entre ces indices et le lissage. Les grandes cuvettes (supérieure à 5 ha) sont composées de 57 % de cuvettes à contours très lissés, 35 % lissés et 8 % moyennement lissés. Les grandes cuvettes à forme arrondie et amiboïde sont à 100 % très lissées quelles que soient leurs orientations. 7 % des contours des grandes cuvettes étirées sont seulement moyennement lissés.

Les cuvettes de taille moyenne ou grande, à forme arrondie et amiboïde moyennement lissées n'ont pas été observées dans le Département de Gouré. Par contre, on note des formes allongées moyennement lissées qui représentent 8 % des cuvettes de taille moyenne et 6 % des cuvettes de grande taille. Les cuvettes de taille moyenne sont très lissées à 56 %, lissées à 36 % et moyennement lissées à 8 %.

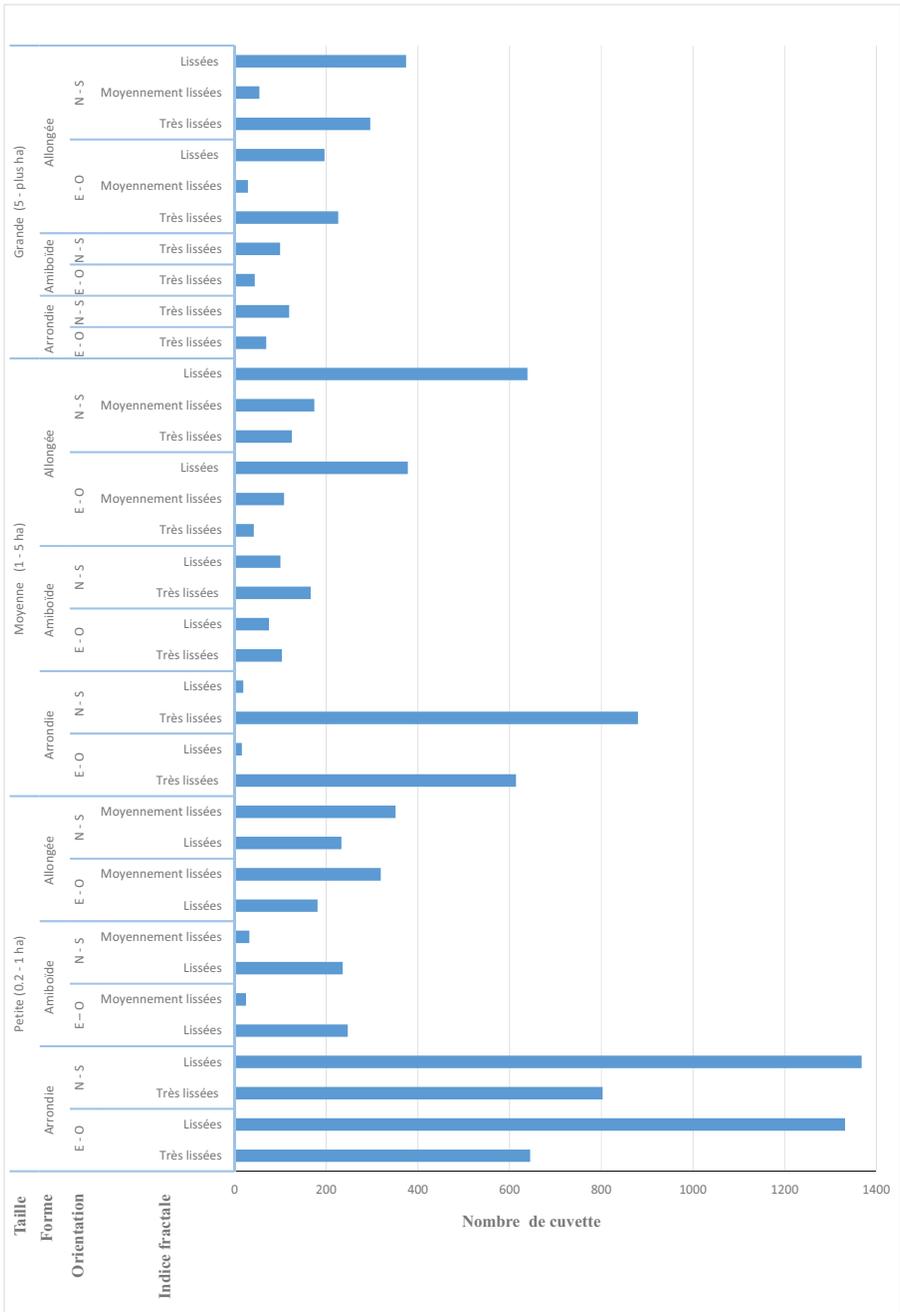


Figure 35- Groupement des classes d'indice fractal de cuvettes en fonction de leurs tailles, leurs formes et leurs orientations

On note que 25% des contours des petites cuvettes (inférieures à 1 ha) sont très lissés, 62 % lissés et 13 % moyennement lissés. 61 % des petites cuvettes orientées N-S et 64 % de celles orientées E-W sont lissées. Les petites cuvettes arrondies ont essentiellement des contours lissés (65%) et très lissés (35%) et sont constituées par 48 % de cuvettes orientées E-W et 52 % de cuvettes N-S.

Les petites cuvettes à contours moyennement lissés totalisent 55 cuvettes amiboïdes et 656 cuvettes allongées soient 12.3 % des cuvettes de cette taille. Les petites cuvettes allongées sont moins lissées que les formes arrondies et amiboïdes. Sur 1093 cuvettes à contours moyennement lissés, 61% sont allongées avec une taille inférieure à 1 ha.

Quel que soit le groupe ou sous-groupe de taille ou de forme, les cuvettes lissées ou très lissées sont numériquement plus nombreuses dans la direction N-S que celle à E-W. Sur les 4230 cuvettes à contours très lissés, 59% sont orientées N-S et 41 % E-W. sur, les 5966 cuvettes orientées N-S, 49 % ont des contours lissés, 41 % des contours très lissés et 10 % des contours moyennement lissés.

Aussi, pour voir le lien entre le lissage et l'ensablement, une analyse du risque d'ensablement est effectuée sur 120 cuvettes. L'analyse des 120 cuvettes (figure 36) montre sur quarante cuvettes à contour très lissé, le risque d'ensablement est faible pour 43 % des cuvettes à contour très lissé et moyen pour 18 %. Il est par contre fort pour treize cuvettes. Dans le groupe des cuvettes à contour lissé, le risque d'ensablement est élevé pour 27.5 % des cuvettes du groupe et faible pour 47.5 %. Les cuvettes moyennement lissées, quant à elles présentent un risque d'ensablement fort pour 65 % des cuvettes du groupe et faible pour 22.5 %.

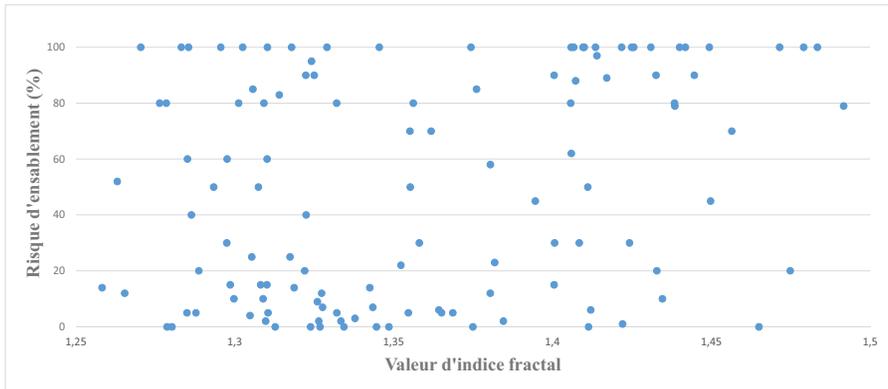


Figure 36 - Répartition du risque d'ensablement des valeurs de dimension fractale de 120 cuvettes en fonction du risque d'ensablement

Le tableau 14 montre que les cuvettes à contours moyennement lissés concernent les cuvettes à forme amiboïdes (6) et allongées (36). 60 % des cuvettes allongées sont moyennement lissées et présentent un risque d'ensablement fort pour 41 % des cuvettes allongées et faible pour 12 %.

L'analyse visuelle d'images SPOT 5-THX des 120 cuvettes montre que plus de 80 % des cuvettes moyennement lissées ont des alentours occupés par des zones de cultures pluviales. Le risque d'ensablement des cuvettes arrondies très lissées et lissées est faible pour 50 % des cuvettes du groupe et fort pour 27 %. Sur le tableau 14, on note des cuvettes oasiennes à contours lissés et très lissés présentant des signes de risque d'ensablement (présence de dunes vives plus des zones de cultures pluviales) faible à fort (faible 45 %, moyen 14% et fort 30 %) autour de leurs abords immédiats et celles à contours lissés et très lissés sans aucun signe de risque d'ensablement (nul 11%) par des dunes vives ou par d'autres facteurs tel que le ruissellement.

Les valeurs faibles de la dimension fractale des cuvettes oasiennes du Département de Gouré permettent d'affirmer que dans le centre-est du Niger, toutes les cuvettes ont subi d'une façon ou d'une autre l'action éolienne (Tidjani, 2008 ; Kanembou et Karimoune, 2013). L'analyse à l'aide de l'indice fractal a permis de hiérarchiser leurs degrés d'irrégularité ou de fragmentation, donc la rugosité de leur contour.

Tableau 14 - Croisement des classes de forme, d'indice fractal et de risque d'ensablement de 120 cuvettes

<b>Forme</b>	<b>Indice fractal</b>	<b>Risque d'ensablement</b>	<b>Nombre</b>	<b>%</b>	
Arrondie (36.7 %)	Très lissées (23.3 %)	Nul	1	0.8	
		Faible	15	12.5	
		Moyen	4	3.3	
		Fort	8	6.7	
	Lissées (13.3 %)	Nul	4	3.3	
		Faible	7	5.8	
		Moyen	1	0.8	
		Fort	4	3.3	
	Amiboïde (14.2 %)	Très lissées (2.5 %)	Nul	1	0.8
			Moyen	1	0.8
			Fort	1	0.8
		Lissées (8.3 %)	Faible	6	5.0
Moyen			2	1.7	
Fort			2	1.7	
Moyennement lissées (3.3 %)		Faible	2	1.7	
		Fort	2	1.7	
Allongée (49.2 %)	Très lissées (7.5 %)	Nul	1	0.8	
		Faible	2	1.7	
		Moyen	2	1.7	
		Fort	4	3.3	
	Lissées (11.7 %)	Nul	2	1.7	
		Faible	6	5.0	
		Moyen	1	0.8	
		Fort	5	4.2	
	Moyennement lissées (30 %)	Nul	2	1.7	
		Faible	7	5.8	
		Moyen	3	2.5	
		Fort	24	20	

Cette rugosité traduit l'impact de l'ensablement et donc des remaniements éoliens sur ces cuvettes. Le processus d'ensablement dans la zone d'étude est surtout caractérisé par le comblement des cuvettes oasiennes, modifiant ainsi leurs limites. Une cuvette dont les limites naturelles sont régulières est identifiée dans cette étude comme une « cuvette lissée ». Le lissage des contours des cuvettes s'explique par une prédominance de l'érosion éolienne généralement génératrice de formes régulières.

En effet, outre les phénomènes d'érosion éolienne bien connus, le lissage des contours des cuvettes peut être lié aussi soit au passage des animaux depuis la dune pour aller s'abreuver au niveau de la cuvette, soit à la dernière sécheresse qui avait dénudé toute la dune favorisant ainsi l'érosion hydrique dès les premières pluies. Une des formes d'ensablement des cuvettes de la région de Gouré est bien celle liée à l'érosivité des pluies. L'ensablement peut se faire par des portions par envahissement partiel ou total de la cuvette. Quand, l'ensablement menace une cuvette de forme amiboïde de toute part, les sables vifs couvrent complètement la cuvette de tous les côtés. Les particules de sable finissent par engorger la cuvette (Kanembou et Karimoune, 2013). Les contours des cuvettes circulaires ou amiboïdes affectés de ce type d'ensablement deviennent plus irréguliers qu'auparavant.

Les cuvettes dont les contours sont très irréguliers correspondent à des cuvettes « non lissées ». Lorsque l'ensablement menace une cuvette allongée selon la largeur et la direction d'avancement de la dune vive, dans un secteur bien circonscrit, les contours des cuvettes de ce secteur deviennent plus lobés au rythme d'avancement de la dune. Dans ce cas, l'envahissement se traduit par des sortes de langues de sable qui vont faire que les contours des cuvettes seront plus irréguliers qu'auparavant. C'est pourquoi l'essentiel des cuvettes moyennement lissées ont des formes allongées avec des contours lobés.

### **Conclusion partielle**

Au terme de cette analyse une classification des cuvettes oasiennes a été faite suivant les valeurs de leurs indices de morphologie et d'orientation. L'indice de forme de Gravelius a permis d'identifier cinq classes de cuvettes (circulaires, ovoïdes, amiboïdes, étirées et très étirées ou étirées-amiboïdes). Plus de la moitié des cuvettes circulaires et ovales ont des aires inférieure à

0.5 ha alors que les très étirées sont en général de grandes cuvettes assimilables à des bas-fonds.

L'orientation des cuvettes a donné des indications complémentaires sur la formation et la dynamique de ces cuvettes. Elle a permis d'identifier quatre secteurs majeurs d'orientation des cuvettes : E-W (7319 ha, 21.9 % superficie totale des cuvettes), N-S (5898 ha, 17.6 % superficie totale des cuvettes), NE-SW (8458 ha, 25.3 % superficie totale des cuvettes) et SE-NW (11775 ha, 35.2 % superficie totale des cuvettes). L'orientation d'une cuvette oasienne est déterminée par les unités de paysage qui les entourent. Les cuvettes sont entourées soit par des reliefs du socle associés aux dunes soit par des dunes longitudinales ou à orientations E-W et NE-SW, soit par des dunes transversales ou à orientations N-S et SE-NW.

Notons que les indices morphologiques et l'orientation des cuvettes oasiennes ayant permis d'approcher leur dynamique géomorphologique et particulièrement les risques dominants liés à aux remaniements éoliens, le chapitre IV suivant vise à caractériser plus précisément les cuvettes oasiennes afin d'évaluer leurs potentialités agricoles à l'échelle des unités de paysage qui les composent.

## **CHAPITRE IV. IDENTIFICATION ET CARACTERISATION DES UNITES PAYSAGERES DES CUVETTES OASIENNES ET DE LEURS ALENTOURS ASSOCIES A L'AIDE DES IMAGES SPOT 5-THX**

### **Introduction**

La présente étude de «caractérisation des unités de paysage des cuvettes et de leurs alentours» vise à élaborer des indicateurs quantitatifs du niveau de dégradation et des potentialités des cuvettes oasiennes. Ces indicateurs quantitatifs sont élaborés à partir d'images à très haute résolution provenant du capteur SPOT 5-THX. C'est la première fois qu'une telle étude systématique faisant intervenir la télédétection pour caractériser les cuvettes oasiennes est réalisée.

### **IV.1. MATÉRIEL ET MÉTHODES**

#### **IV.1.1. Données utilisées**

L'étude a utilisé les six images SPOT 5-THX du tableau 1 ainsi que les résultats améliorés sur l'identification des cuvettes au chapitre III. Les informations utilisées sur les cuvettes concernent leur localisation, leur nombre et leurs superficies. Ainsi 10717 cuvettes oasiennes ont été inventoriées. Ces données sont complétées par des observations de terrain.

#### **IV.1.2. Méthodes**

##### ***IV.1.2.1. L'extraction des cuvettes oasiennes et de leurs alentours***

Pour bien répondre aux objectifs de cette étude consistant à déterminer les caractéristiques des unités de paysage de cuvette et de leurs alentours, deux masques permettant de traiter séparément les cuvettes de leurs alentours, ont été définis.

Le premier concerne les cuvettes oasiennes et le deuxième les alentours des cuvettes. Une zone tampon d'un kilomètre de largeur autour des limites de chaque cuvette a été considérée comme représentative des alentours de cuvette. Cette distance est suffisante pour caractériser les différentes unités d'occupation des sols autour des cuvettes oasiennes et ayant des impacts

directs sur celles-ci. Elle constitue une limite raisonnable au-delà de laquelle une activité menée n'aura plus d'impacts immédiats sur la cuvette oasienne.

#### ***IV.1.2.2. La reconnaissance, la catégorisation préliminaire et l'échantillonnage des cuvettes et leurs alentours***

Un travail d'analyse visuelle et de traitement d'image satellitaire a été effectué pour une catégorisation préliminaire de la zone d'étude et un échantillonnage en vue d'une caractérisation plus poussée.

##### *IV.1.2.2.1. Caractérisation exploratoire de reconnaissance*

Un travail préliminaire de délimitation, par traitement des images, des principales unités paysagères a été effectué sur les images SPOT 5-THX de 2.5 m de résolution. Ceci a conduit à diviser l'espace en unités de types de surfaces semblables (zones isophènes) suivant des critères visuels et géomorphologiques. Une composition colorée a été réalisée suivie d'une correction géométrique à l'aide des cartes topographiques.

Une mission de reconnaissance du milieu a été effectuée pour cerner les unités d'occupation des sols et établir des clefs d'interprétation.

##### *IV.1.2.2.2. Elaboration de la clef d'interprétation*

La clef d'interprétation ou nomenclature des différentes unités de paysages de cuvette et de leurs alentours sert spécifiquement à identifier et interpréter les classes qui serviront de base pour l'analyse des images SPOT 5-THX. Cette clé mobilise surtout des critères géomorphologiques et d'occupation du sol (tableau 15). Le premier niveau de découpage repose sur la segmentation de l'espace en unités géomorphologiques (Gondard, 1986 ; Richard, 1989). Les cuvettes oasiennes et leurs alentours sont ainsi segmentés en : relief résiduel, sommet de dune, glaciais/pédiments, flanc de dune, moyenne et basse terrasse de cuvette et bas-fond central de cuvette.

Le terme « terrasse » utilisé dans ces milieux semi-arides peut prêter à controverse. Une terrasse est une surface qui a été édifiée par un ensemble de processus de terrassement consécutif à des dépôts alluviaux. Or les cuvettes oasiennes se sont développées sur des terrasses anciennes d'oueds alors fonctionnels. Par ailleurs depuis la généralisation de l'endoréisme à l'échelle des réseaux hydrographiques, des ruissellements et ravinements bien que

limités à l'échelle des versants édifient des cônes sableux dont la coalescence en bas de pente détermine des formes de terrasses.

Tableau 15 - Clefs d'interprétation des unités de paysage des cuvettes oasiennes et paysages associés

Unité géomorphologique	Unités d'occupation des sols	Niveau d'agrégation
Relief résiduel de commandement	Affleurement rocheux	Colline à affleurement rocheux
Sommet d'édifice dunaire de commandement	Culture pluviale Steppe arborée Steppe arbustive Steppe herbeuse Surfaces ravivées	Édifice dunaire et vallée sèche à cultures pluviales ; Édifice dunaire à surfaces ravivées (D <sub>SR</sub> ) ; Édifice dunaire et vallée
Flanc d'édifice dunaire	Culture pluviale Steppe arbustive Steppe herbeuse Surfaces ravivées	sèche à steppes arborées ; Édifice dunaire à steppes arbustives ; Édifice dunaire à steppes herbeuses.
Vallée sèche	Culture pluviale Steppe arborée	
Terrasse moyenne sableuse de cuvette	Savane arborée Savane arborée dégradée ; Plages de sable dénudées	Moyenne et basse terrasses à savanes arborées (m_bT <sub>SA</sub> ) ; Moyenne et basse terrasses à savanes
Basse terrasse limono-sableuse de cuvette	Savane arborée ; Savane arborée dégradée ; Savane herbeuse ; Cultures irriguées ; Plages de sable dénudées	arborées dégradées ; Moyenne et basse terrasses à savanes herbeuses (m_bT <sub>SH</sub> ) ; Moyenne et basse terrasses et bas fond central de cuvette à plages de sable dénudées (m_bT_BF <sub>s</sub> ) ; Basse terrasse de cuvette à cultures irriguées (bT <sub>CI</sub> ).
Bas-fonds central de cuvette	Nappe d'eau superficielle ; Sols nus à natron ; Plages de sable dénudées	Bas-fond central de cuvette à nappes d'eau superficielle et/ou à sols nus à natron

Ensuite, la différenciation des unités géomorphologiques des cuvettes oasiennes en unités paysagères par l'intégration des critères descriptifs relatifs

à leurs sols, leurs végétations, les eaux de surface et leurs modes d'occupation humaine a constitué le second niveau de découpage (Antonio et Louisa, 1998). Enfin, pour réduire la confusion entre les classes d'occupation des sols, ces unités de paysage ont été agrégées à 12 niveaux. Par exemple, sur une image multispectrale SPOT 5-THX, les unités d'occupation des sols observées sur le terrain sur les flancs d'édifice dunaire se confondent le plus souvent à celles des sommets d'édifice dunaire. Ceci a conduit à grouper les unités de paysages des sommets et des flancs de dunes en édifice dunaire à steppes arbustives, en édifice dunaire à steppes herbeuses ou en édifice dunaire à surfaces ravivées.

En plus de ces unités, on note les zones de cultures pluviales et de steppes arborées situées sur les édifices dunaires et dans les vallées sèches. Ces zones de cultures pluviales et de steppes arborées des vallées sèches présentent les mêmes niveaux de réflectance sur les édifices dunaires d'une même image. C'est pourquoi, deux unités ont été retenues : édifice dunaire et vallée sèche à cultures pluviales et édifice dunaire et vallée sèche à steppes arborées.

De même, les classes d'occupation des sols à l'intérieur des cuvettes qui se reflètent de la même manière sur les unités géomorphologiques ont été agrégées. Il s'agit de :

- les moyenne et basse terrasses à savanes arborées qui représentent une association végétale où domine essentiellement le palmier doum et le palmier dattier ;
- les moyenne et basse terrasses à savanes arborées dégradées ;
- les moyenne et basse terrasses à savanes herbeuses : ce sont des zones en jachères ou des pâturages composées de végétation herbacées à l'intérieur de la cuvette.

On note aussi les plages de sables dénudés sur les moyenne et basse terrasses de cuvette ainsi que dans le bas-fond central. Ce sont des zones recouvertes de sables déliés remaniés dans les axes de passages des animaux depuis la dune pour aller pâturer ou s'abreuver à l'intérieur de la cuvette.

Quant à la basse terrasse de cuvette à cultures irriguées, elle représente les zones de cultures maraîchères et fruitières.

#### ***IV.1.2.3. L'échantillonnage des cuvettes et leur environnement***

La zone d'étude est caractérisée par une diversité de cuvettes sur le plan biophysique. C'est pourquoi un échantillonnage ou choix des zones d'entraînement a été fait. Il s'est agi de choisir des pixels homogènes et contigus représentatifs des classes potentielles d'unités de paysages de cuvettes et de paysages associés aux cuvettes afin de définir les clés de classification de l'image. Le choix des échantillons vise à définir les propriétés des signatures de chacune des classes d'objets au moyen d'un échantillon d'éléments de l'image de classes connues. Les échantillons sont représentatifs des classes d'objets et répartis de manière homogène sur l'ensemble de la zone d'étude. Ils couvrent aussi l'hétérogénéité interne de chaque thème.

169 cuvettes ont été choisies. Sur chaque cuvette, des aires d'entraînements ont été identifiées sur les unités géomorphologiques. Ainsi, les différentes formes de réflectance autour et à l'intérieur de ces cuvettes oasiennes ont été identifiées, localisées et délimitées par GPS sur le terrain. Parmi ces cuvettes, six (Gassafa, Abké, Kantou, Gacheké, N'guiguïdjé et Kilakina) ont fait l'objet d'une caractérisation plus poussée sur le terrain en termes de végétation et de sols.

Au niveau des unités de paysages associés aux cuvettes, cinquante polygones de chaque classe retenue dans la clé d'interprétation, ont été utilisés comme zone d'entraînement.

#### ***IV.1.2.4. L'interprétation et le traitement des images SPOT 5-THX***

L'interprétation est faite à travers une classification d'image par objet avec le logiciel eCognition, en tenant compte des clefs ci-dessus définies. Les principales étapes de traitement d'une image avec le logiciel eCOGNITION ont été déjà développées dans le Chapitre 2.

#### ***IV.1.2.5. L'évaluation de la classification***

La matrice de confusion a permis d'évaluer le niveau d'exactitude de la classification des principales unités de paysage par rapport aux observations faites sur le terrain (Congalton, 1991). Par cet outil, la précision globale, le taux d'identification d'une classe et de fiabilité décrits dans le Chapitre 2 ont été calculés.

L'évaluation est réalisée à partir d'un jeu de données de terrain, de données issues d'analyse d'image SPOT 5-THX et de cartes topographiques au 1/200000. Les 605 cuvettes qui ont servi à évaluer les performances des trois méthodes de détection des cuvettes (voir Chapitre 2) ont été utilisées pour valider les unités paysagères des cuvettes. 1020 polygones ou zones de contrôle représentant les classes de ces unités paysagères (tableau 15) ont été échantillonnés dans les 605 cuvettes. La matrice de confusion des unités de paysage associées aux cuvettes a été réalisée grâce à 350 polygones qui correspondent aux classes définies dans la clé d'interprétation.

#### ***IV.1.2.6. L'élaboration d'indicateurs spatiaux de caractérisation***

Des indicateurs spatiaux de caractérisation des cuvettes ont été élaborés sur la base des unités de paysage des cuvettes et de leurs alentours citées dans le tableau 15 (Huffman et Dumanski, 1985; Andriessse et Fresco, 1991; Oloukoi et Mama, 2009). Ces indicateurs tiennent notamment compte des surfaces de dépôts sableux dans les cuvettes, des surfaces salinisées de cuvettes et des surfaces ravivées de dune à proximité des cuvettes. Deux groupes d'indicateurs ont été utilisés dans cette étude. Le premier groupe concerne des indicateurs de potentiel valorisable de cuvette et le deuxième des indicateurs de dégradation et de menace d'ensablement des cuvettes. Les indicateurs de potentiel agricole de cuvette concernent les pourcentages de cuvette en cultures irriguées et en ressources forestières. Les indicateurs de dégradation et de menace d'ensablement correspondent respectivement aux dépôts sableux à l'intérieur des cuvettes et les surfaces ravivées de dune autour de celle-ci.

Les valeurs de ces indicateurs varient de 0 à 100%. Des classes d'intervalles égaux de 25, ont été créées pour apprécier ces indicateurs (tableau 16). Pour chacun de ces indicateurs, les cuvettes ayant la valeur zéro ont été considérées dans une classe à part entière.

##### *IV.4.3.6.1. Les indicateurs du potentiel valorisable*

Les indicateurs de potentiel agricole de cuvette se répartissent en :

- **Indicateur de surface cultivable de cuvette**

Le pourcentage des superficies cultivables de cuvette (PSCC) est le rapport entre les surfaces cultivables et la surface totale de la cuvette. Les superficies

cultivables comprennent  $m\_bT_{SH}$  et  $bT_{CI}$  représentent respectivement les surfaces des moyenne et basse terrasses à savanes herbeuses et la basse terrasse de cuvette à cultures irriguées.

$$PSCC (\%) = \frac{bT_{CI} + m\_bT_{SH}}{\text{Superficie totale de la cuvette}} * 100$$

Tableau 16 - Eléments de hiérarchisation des classes d'indicateurs spatiaux de caractérisation des cuvettes

Classe	Appréciation
0	Nul
] 0 à 25]	Faible
] 25 à 50]	Moyen
] 50 à 75]	Fort
] 75 à 100]	Très fort

Elles n'intègrent pas les savanes arbustives et arborées des cuvettes. Cet indicateur permet de faire une typologie des cuvettes en fonction leur potentiel en surface cultivable. Le choix de cet indicateur se justifie dans une zone qui regorge de nombreuses cuvettes et sur lesquelles l'essentiel des cultures vivrières sont produites au cours des deux dernières décennies suite aux aléas climatiques (Djambouto, 2005; Jahiel, 1998).

- **Niveau d'exploitation des surfaces cultivables de cuvette**

Le niveau d'exploitation des surfaces cultivables de cuvette (NESC) est obtenu en faisant le rapport entre les surfaces cultivées (basse terrasse de cuvette à cultures irriguées) et les surfaces cultivables.

$$NESC (\%) = \frac{bT_{CI}}{bT_{CI} + b\_mT_{SH}} * 100$$

- **Pourcentage des surfaces boisées de cuvette**

Le pourcentage des surfaces boisées de cuvette (PSBC) est le rapport des surfaces boisées (savane arborée et savane arborée dégradée) d'une cuvette sur la surface totale de la cuvette. Le PSBC est obtenu selon la formule suivante :

$$PSBC (\%) = \frac{m\_bT_{SA} + b\_mT_{SAD}}{\text{Superficie totale de la cuvette}} * 100$$

$m\_bT_{SA}$  et  $m\_bT_{SAD}$  sont respectivement les surfaces des moyenne et basse terrasses à savanes arborées et les surfaces des moyenne et basse terrasses à savanes arborées dégradées de cuvette.

Cet indicateur renseigne sur le potentiel des cuvettes à fournir du bois, mais aussi divers produits forestiers, notamment les produits de palmiers. Il permet par exemple d'identifier les cuvettes qui ont des potentiels en matériel de fixation mécanique des dunes vives à l'aide des rachis de palmiers doums.

#### *IV.4.3.6.2. Les indicateurs de menace et/ou de dégradation*

Les indicateurs de risque se subdivisent en :

- **Indicateurs de dégradation des cuvettes**

Le pourcentage des surfaces de dépôt sableux des cuvettes (PSDSC) a été utilisé pour apprécier le niveau du risque de dégradation d'une cuvette. Le PSDSC est le rapport entre les surfaces de dépôt à l'intérieur d'une cuvette et la superficie totale de la cuvette. Dans les cuvettes, la dégradation se manifeste par des dépôts sableux qui rendent certaines unités paysagères impropres à l'agriculture. Le PSDSC se calcule comme suit :

$$\text{PSDSC (\%)} = \frac{m\_bT\_BF_s}{\text{Superficie totale de la cuvette}} * 100$$

$m\_bT\_BF_s$  représente la surface des moyenne et basse terrasses et bas fond central de cuvette à plages de sable dénudées.

- **Indicateurs de menace d'ensablement des cuvettes**

Les dunes vives sont les zones sources de sables pouvant envahir les cuvettes. C'est pourquoi dans cette étude, la menace d'ensablement d'une cuvette a été appréciée par le pourcentage de surfaces ravivées de dune dans une zone tampon autour de la cuvette sur la superficie totale de la zone tampon (PSRDA).

Deux types de menaces ont été différenciés par deux indicateurs distincts. Il s'agit de l'indicateur de menace à terme immédiat (PSRDA<sub>500m</sub>) et celui de menace à moyen terme de cuvette (PSRDA<sub>500-1000m</sub>). La menace est dite immédiate si la dune vive se trouve dans une couronne de 500 m de large autour de la cuvette et à long terme si elle se localise dans la couronne comprise entre 500-1000 m des limites de la cuvette (figure 37).

$$PSRDA_{500m} (\%) = \frac{D_{SR} \text{ dans la couronne de } 500 \text{ m de large autour de la cuvette}}{\text{Superficie totale d'une couronne de } 500 \text{ m autour de la cuvette}} * 100$$

$D_{SR}$  représente la surface d'édifice dunaire à surfaces ravivées.

$$PSRDA_{500-1000m} (\%) = \frac{D_{SR} \text{ dans la couronne comprise entre } 500-1000 \text{ des limites de la cuvette}}{\text{Superficie totale d'une couronne de } 500-1000 \text{ m autour de la cuvette}} * 100$$

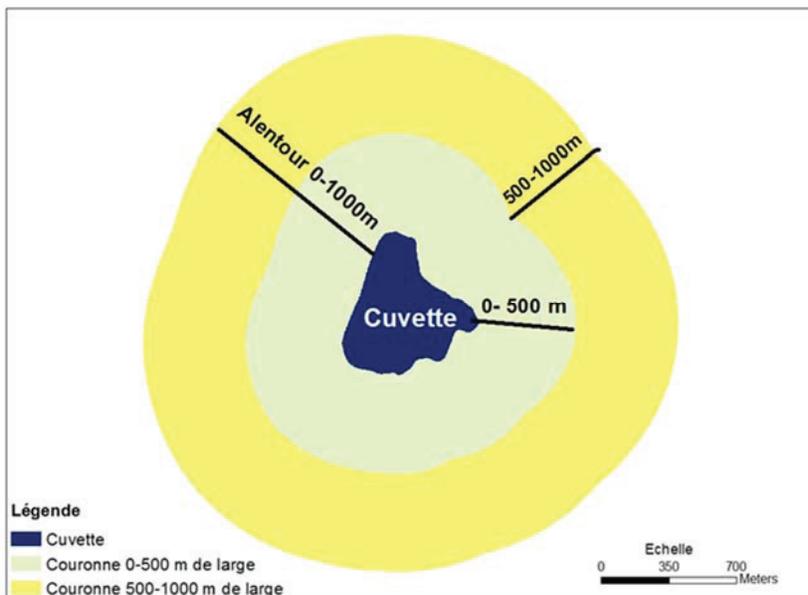


Figure 37 - Représentation des couronnes de 0-500 et 500-1000m de large autour d'une cuvette oasienne

## IV.2. RÉSULTATS ET DISCUSSION

### IV.2.1. Identification par télédétection des unités de paysage des cuvettes oasiennes et de leurs alentours

La carte des unités de paysage du Département de Gouré permet de distinguer deux grands ensembles (figures 38, 39 et 40). Il s'agit des unités de paysage de cuvettes et celles des unités associées aux cuvettes.

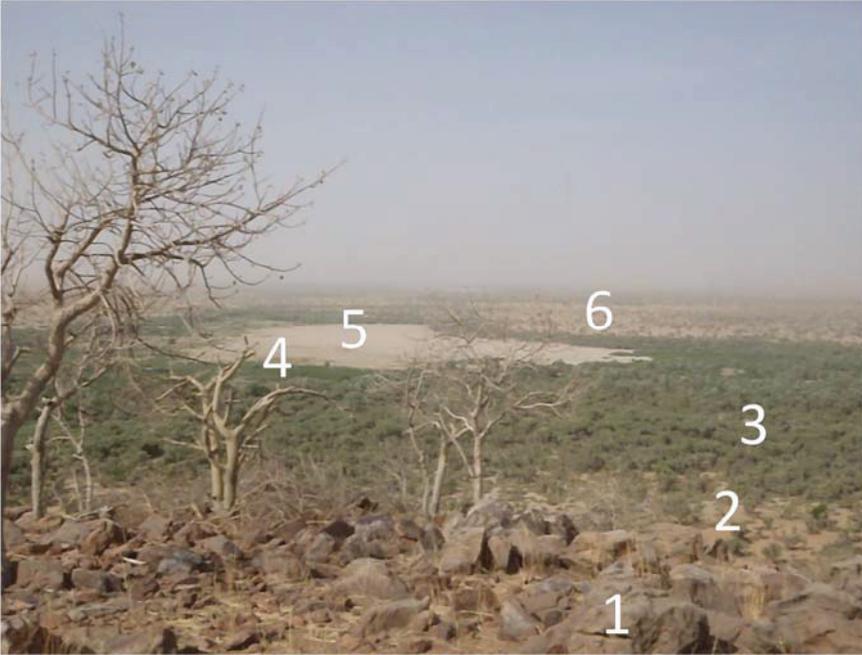


Figure 38 - Photo de la cuvette de Gassafa située au sud-est du Département de Gouré.

Légende - 1 : Affleurement rocheux, 2. Pédiment/glacis, 3. Moyenne terrasse de cuvette, 4. Basse terrasse de cuvette, 5. Bas-fond central de cuvette à sol nu à natron, 6. Édifice dunaire

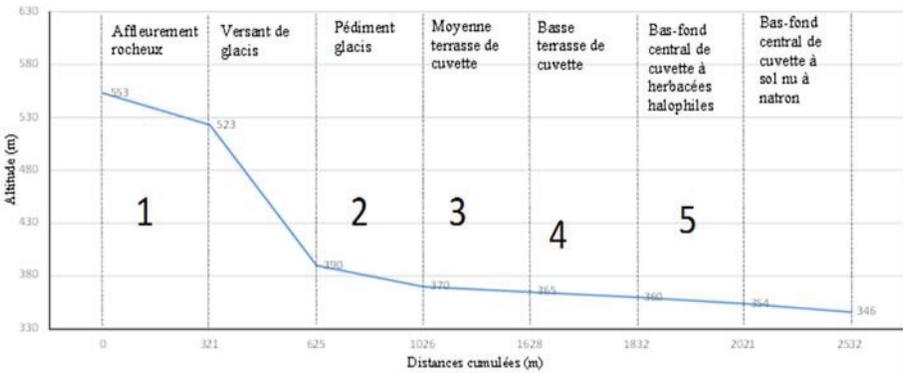


Figure 39 - Profil topographique de la cuvette de Gassafa découpé en unités géodynamiques

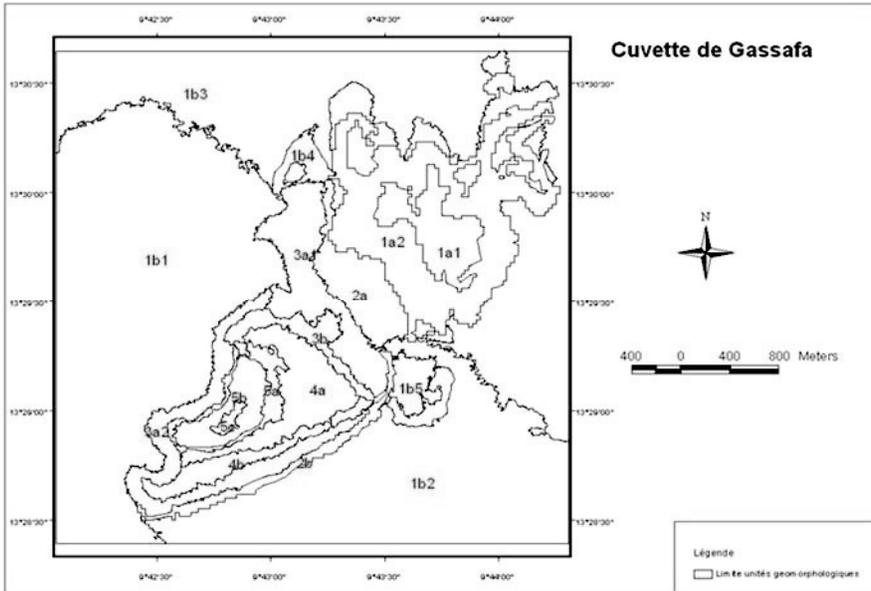


Figure 40 - Structure spatiale de la cuvette Gassafa (unités géodynamiques et leurs limites). D'après interprétation préliminaire image SPOT 5-THX

**Légende** - 1a1: relief résiduel de commandement, 2a2 : base de relief résiduel, 1b: édifice dunaire de commandement, 1b1 : sommet de dune à culture 1 pluviale, 1b2 : sommet de dune à culture 2 pluviale, 1b3 : sommet de dune à steppe arbustive à *Leptadenia pyrotechnica*, 1b4 : sommet de dune dégradée, 1b5 : agglomération sur sommet de dune, 2a: pédiment/glacis de piedmont de relief résiduel, 2b: flanc d'édifice dunaire, 3a<sub>1</sub>: terrasse moyenne limono-sableuse en piedmont de relief résiduel (auréole à *Hyphaene thebaïca*), 3a<sub>2</sub>: terrasse moyenne sableuse en piedmont d'édifice dunaire (auréole à *Hyphaene thebaïca*), 3b: terrasse moyenne limono-sableuse à stigmes halo- et hydro-morphes (auréole à *Phoenix dactylifera*), 4a: basse terrasse limono-sableuse (auréole à spéculations agricoles), 5a: portion du bas fond central à herbacées halophiles, 5b: portion du bas fond central à sols nus (plages à natron), 5c: portion du bas fond central à nappe d'eau superficielle

#### IV.2.1.1. Les unités de paysage associées aux cuvettes oasiennes

L'évaluation des unités de paysage associées aux cuvettes a donné une précision globale de classification de 94.5% (tableau 17).

Tableau 17 - Matrice de confusion des unités de paysage associées aux cuvettes en 2013 (unité de base est le pixel)

	1	2	3	4	5	Total	Taux de fiabilité
<b>1</b>	45210	4208	1468	3386	2517	56789	79.6
<b>2</b>	1256	43929	0	0	0	45185	97.2
<b>3</b>	1500	1455	134218	70	498	137741	97.4
<b>4</b>	17	0	0	103451	0	103468	99.9
<b>5</b>	820	0	0	0	28873	29693	97.3
<b>Total</b>	48803	49592	135686	106907	31888	372876	
<b>Taux d'identification</b>	92.6	88.6	98.9	96.8	90.5		
<b>Précision globale (%)</b>	<b>94.5</b>						

**Légende – 1 :** édifice dunaire et vallée sèche à culture pluviale, **2 :** édifice dunaire et vallée sèche à steppe arborée, **3 :** édifice dunaire à steppe arbustive, **4 :** édifice dunaire à surface ravivée, **5 :** colline à affleurements rocheux.

Ces résultats peuvent être considérés comme satisfaisants (Congalton, 1991). Le taux d'identification des unités de paysage associées aux cuvettes dépasse 90% pour toutes les unités sauf au niveau des édifices dunaires et vallées sèches à steppe arborée où il est à 88.6%.

Les observations de la zone révèlent trois systèmes d'unités de paysage associées aux cuvettes: les systèmes des reliefs résiduels du socle ou collines rocheuses, les systèmes des vallées sèches et les systèmes des édifices dunaires (tableau 18, figures 39, 40).

Les édifices dunaires et vallées sèches à cultures pluviales constituent l'unité paysagère la plus représentative avec 58% de la superficie totale des unités de paysage associées aux cuvettes (tableau 18 et figures 41 et 42).

*Tableau 18 - Typologie et importance des unités paysagères des alentours des cuvettes oasiennes du Département de Gouré*

<b>Unités paysagères des alentours de cuvettes oasiennes</b>	<b>Superficie totale (ha)</b>	<b>%</b>
Colline à affleurement rocheux	5136	0.7
Édifice dunaire et vallée sèche à culture pluviale	423876	58
Édifice dunaire à surface ravivée	32123	4.4
Édifice dunaire et vallée sèche à steppe arborée	38827	5.3
Édifice dunaire à steppe arbustive	221994	30.4
Édifice dunaire à steppe herbeuse	8805	1.2

Les édifices dunaires à steppe arbustive sont caractérisés par une association de *Leptadenia pyrotechnica* et de *Calotropis procera*. Cette unité représente la principale formation de végétale naturelle avec 221994 ha soit 30.4 % de la zone d'étude et est à vocation pastorale. Cependant, cette steppe arbustive tend à se dégrader du fait de la concentration des animaux et aussi de l'abattage abusif des arbres ou arbustes.

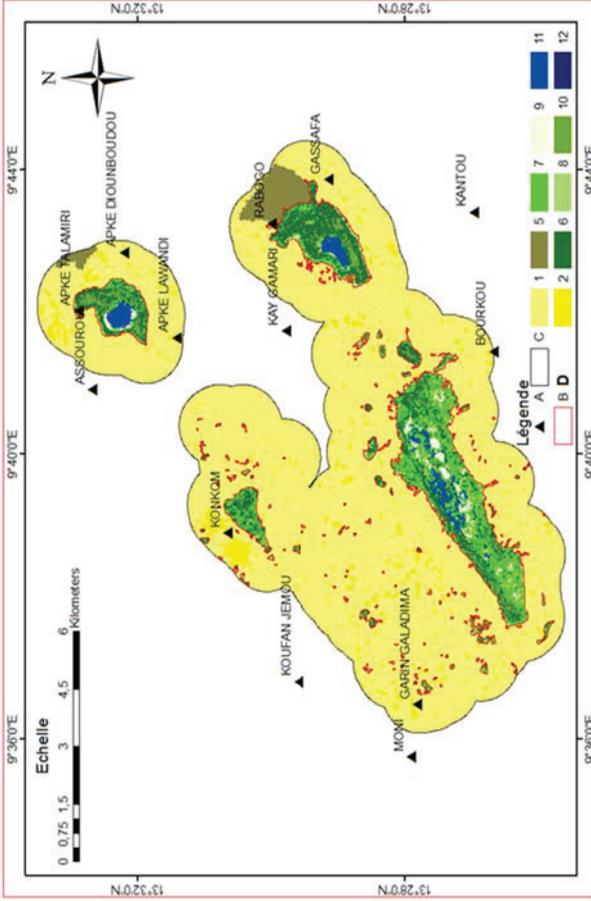


Figure 41- Carte des unités de paysage des cuvettes oasiennes et de leurs alentours dans le sud-ouest Département de Gouré

**Legende** - A : village, B : limite des alentours des cuvettes, C : limite des alentours des cuvettes, D : Unités de paysage - 1- Édifice dunaire et vallée sèche à cultures pluviales, 2- Édifice dunaire à steppes arbustives, 3- Édifice dunaire et vallée sèche à steppes arborées, 4- Édifice dunaire à surfaces ravivées, 5- Colline à affleurements rocheux, 6- Moyenne et basse terrasses à savanes arborées, 7- Moyenne et basse terrasses à savanes arborées dégradées, 8- Moyenne et basse terrasses à savanes herbueses, 9- Moyenne et basse terrasses et bas fond central de cuvette à plages de sable dénudées, 10- Basse terrasse de cuvette à cultures irriguées, 11- Bas-fond central de cuvette à nappes d'eau superficielle et/ou à sols nus à natron.

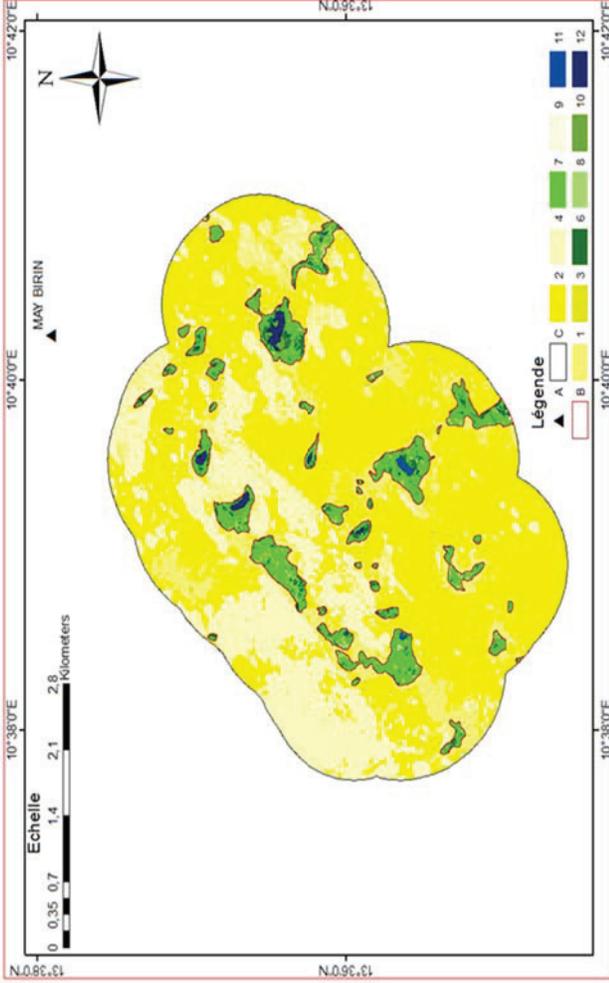


Figure 42 - Carte des unités de paysage des cuvettes oasiennes et de leurs alentours dans le sud-est du Département de Gouré

**Légende** - A : village, B : limite des alentours des cuvettes, C : limite des alentours des cuvettes, D : Unités de paysage - 1- Édifice dunaire et vallée sèche à cultures pluviales, 2- Édifice dunaire à steppes arbustives, 3- Édifice dunaire et vallée sèche à steppes arborées, 4- Édifice dunaire à surfaces ravivées, 5- Colline à affleurements rocheux, 6- Moyenne et basse terrasses à savanes arborées, 7- Moyenne et basse terrasses à savanes arborées dégradées, 8- Moyenne et basse terrasses à savanes herbuses, 9- Moyenne et basse terrasses et bas fond central de cuvette à plages de sable dénudées, 10- Basse terrasse de cuvette à cultures irriguées, 11- Bas-fond central de cuvette à nappes d'eau superficielle et/ou à sols nus à natron

On remarque une extension non négligeable d'édifices dunaires et vallées sèches à steppe arborée. La steppe arborée représente 38827 ha soit 5.3 % de la superficie totale des alentours de cuvettes. Elle se présente sous forme d'associations végétales constituées de *Acacia raddiana*, *Sclerocarya birrea* et *Balanites aegyptiaca*.

Dans les édifices dunaires à steppe herbeuse (1.2%), le tapis herbacé est dominé par *Cenchrus biflorus* au nord et nord-est et par *Aristida mutabilis* au sud et sud-ouest. Autour des villages, cette unité est représentée par une herbacée pérenne : *Pergularia tomentosa*.

Les édifices dunaires à surface ravivée couvrent 32123 ha soit 4.4 % de la zone d'étude. Sur les images SPOT en fausses couleurs, elles se présentent sous forme de fuseaux bleus orientés. Ces édifices menacent particulièrement les terres de cultures pluviales, les cuvettes et les villages (Bodart *et al.*, 2010). Elles constituent aussi à la fois des zones sources et de dépôts de sable.

Les collines à affleurements rocheux (0.7%) se distinguent des autres unités sur une image SPOT par leur couleur qui varie du gris au noir d'une part et par leur forme massive et élevée d'autre part. Sur le terrain, ces affleurements rocheux sont constitués de roches du socle cristallin (Karimoune *et al.*, 1990; Karimoune et Ozer, 1994).

#### ***IV.2.1.2. Les unités de paysages des cuvettes oasiennes***

La matrice de confusion des unités de paysage des cuvettes donnent des résultats satisfaisants avec une précision globale de 91.4% (tableau 19). Néanmoins, on note un taux d'identification de 81.2% et 88.7% respectivement pour les unités de basse terrasse de cuvette à cultures irriguées et les unités de moyenne et basse terrasses de cuvette à savanes arborées dégradées.

Ces taux en retrait par rapport à ceux des autres unités s'expliquent par le fait que les unités de basse terrasse de cuvette à cultures irriguées se confondent sur les images SPOT 5-THX non seulement avec celles des moyennes et basse terrasses de cuvette à savane arborée dégradée mais aussi avec les moyenne et basse terrasses de cuvette à savanes herbeuses.

Tableau 19 - Matrice de confusion des unités de paysage des cuvettes en 2013 (unité de base est le pixel)

	1	2	3	4	5	6	7	Total	Taux de fiabilité
<b>1</b>	2844	73	0	256	268	2	0	3443	82.6
<b>2</b>	0	8262	0	0	0	0	209	8471	97.5
<b>3</b>	0	0	1122	0	0	0	288	1410	79.6
<b>4</b>	2	726	0	7805	162	43	0	8738	89.3
<b>5</b>	453	2	19	240	4358	399	4	5475	79.6
<b>6</b>	200	7	0	0	124	3569	0	3900	91.5
<b>7</b>	5	74	26	0	0	0	9862	9967	98.9
<b>Total</b>	3504	9144	1167	8301	4912	4013	10363	41404	
<b>Taux d'identification</b>	81.2	90	96.1	94.0	88.7	88.9	95.2		
<b>Précision globale (%)</b>	91.4								

**Légende - 1** : basse terrasse de cuvette à cultures irriguées, 2 : bas fond central de cuvette à nappes d'eau superficielles, 3 : moyenne et basse terrasses et bas fond central de cuvette à plages de sable dénudées, 4 : moyenne et basse terrasses de cuvette à savanes arborées, 5 : moyenne et basse terrasses de cuvette à savanes arborées dégradées, 6 : moyenne et basse terrasses de cuvette à savanes herbeuses, 7 : bas fond central de cuvette à sols nus à natron.

Quant au taux d'identification observé au niveau des unités de moyenne et basse terrasses de cuvette à savane arborée dégradée, il s'explique surtout par une confusion sur les images SPOT 5-THX avec les unités de basse terrasse de cuvette à cultures irriguées et les unités de moyenne et basse terrasses de cuvette à savane arborée.

Dans les cuvettes, les unités de paysages sont organisées de l'extérieur vers l'intérieur en trois unités géomorphologiques : la terrasse moyenne, la basse terrasse et le bas-fond central (figures 38, 39, 40 et 43).

Sur les moyenne et basse terrasses de cuvette, la savane arborée représente 33.1 % de la superficie totale de l'ensemble des cuvettes (tableau 20). La terrasse moyenne à savane arborée est essentiellement composée par *Hyphaene thebaïca* et forme une auréole qui ceinture la cuvette. Cette auréole se trouve au pied d'un flanc de dune souvent peu discriminable dans l'édifice dunaire sur les images SPOT 5-THX. Quant à la basse terrasse à savane arborée, la végétation est constituée en plus de *Hyphaene thebaïca*, par *Phoenix dactylifera*, *Acacia raddiana*, *Balanites aegyptiaca*, *Acacia senegal* et *Faidherbia albida* (Karimou Barké, 2005). On observe aussi la présence de peuplements assez denses de *Prosopis chilensis* qui colonise la moyenne et basse terrasse de la cuvette.

Ces unités apparaissent bien sur la figure 43 où on observe au premier plan de la photo et de l'image SPOT 5-THX le sommet de dune à steppe arbustive, ensuite l'auréole externe de *Hyphaene thebaïca* représentant la savane arborée et enfin la partie centrale où sont pratiquées les cultures irriguées et de décrue.

Tableau 20 - Typologie et importance des unités paysagères des alentours des cuvettes oasiennes du Département de Gouré

Unités paysagères des cuvettes oasiennes	Superficie totale (ha)	%
Basse terrasse de cuvette à cultures irriguées	2999	8.7
Moyenne et basse terrasses et bas fond central à plages de sable dénudées	2430	7
Moyenne et basse terrasses à savane arborée	11453	33.1
Moyenne et basse terrasses à savane arborée dégradée	13512	39.1
Moyenne et basse terrasses à savane herbeuse	2671	7.7
Bas-fond central de cuvette à nappe d'eau superficielle et/ou à sols nus	1488	4.3

On observe sur les moyenne et basse terrasses une savane arborée dégradée. Celle-ci constitue l'unité de paysage la plus représentée avec 39.1 % de la superficie totale des cuvettes. Sur les images, elle se présente sous forme de ceinture discontinue de palmier doum au niveau de la terrasse moyenne.

Sur la basse terrasse de cuvette, les cultures irriguées sont pratiquées sur 8.7 % des superficies des unités de cuvettes. Ces cultures concernent : l'oignon, la laitue, la tomate, le chou, la patate douce, le manioc, la courge, le melon, la canne à sucre. Les cultures fruitières sont composées essentiellement de dattiers, d'agrumes, de manguiers et de palmiers doum.

Le bas-fond central de cuvette constitue la zone submersible par l'eau en saison des pluies et se présente en saison sèche sous forme de sol nu à plage natronnée. Les portions de bas-fond central occupent 4.3 % de la superficie totale des cuvettes alors que les sols nus natronnés représentent 1.9% des surfaces des cuvettes. En effet, en saison sèche lorsque la nappe descend, les sels précipitent et forment une épaisse croûte de couleur gris cendre à brunâtre boursouflée et finement craquelée communément appelée natron. En bordure et à l'intérieur du bas-fond central, on note souvent la présence de roseaux constitués de *Typha australis* et *Phragmites australis*. Ces roseaux, très denses et luxuriants, sont des herbacées vivaces semi-aquatiques (Etienne, 2008).

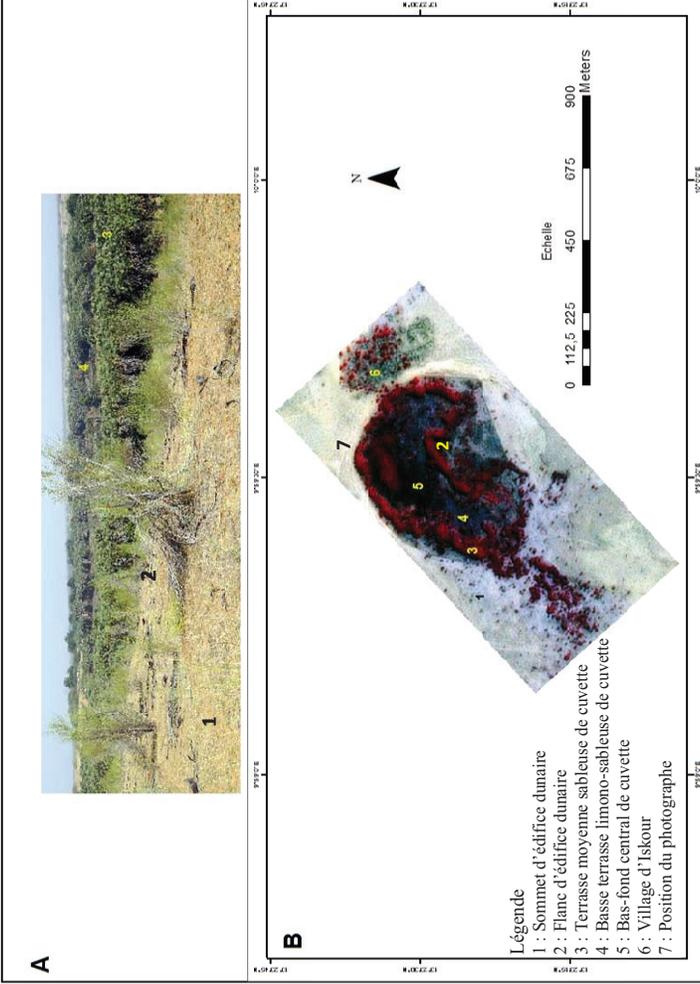


Figure 43 - Photo (A) et image SPOT5 (B) de la cuvette oasienne d'Iskour située au sud du Département de Gouré

À l'intérieur des cuvettes, on note souvent des plages de sable dénudés (7%). Les plages de sable dénudées sont liées à la remise en mouvement des sables dunaires par le vent ou par le ruissellement le long des sentiers de piétinements intenses des animaux qui viennent s'abreuver dans les cuvettes.

Cependant, seul le bas-fond central à nappe d'eau superficielle et/ou à sol nu à natron constitue un indice pour discriminer toutes les cuvettes. En effet, l'ensemble des cuvettes présente des moyennes et basses terrasses. Quant aux cuvettes à bas-fond central (tableau 21), les observations de terrain discernent deux catégories de cuvette, dont les unités, composées de nappe d'eau superficielle et de sols nus à natron, évoluent l'une aux dépens de l'autre. Dans certaines cuvettes à eau affleurante, on observe en saison sèche un plan d'eau central plus une petite couronne de natron et dans d'autres, le plan d'eau au centre disparaît en saison sèche pour laisser la place à un sol nu recouvert de natron.

*Tableau 21 - Nombre et superficie des cuvettes à bas-fond central du Département de Gouré*

	<b>Nombre de cuvette</b>	<b>Surface unitaire moyenne (ha)</b>	<b>Superficie totale (ha)</b>	<b>% du nombre</b>	<b>% des superficies</b>
Cuvette à bas-fond central	1891	10	18523	17.6	53.7
Cuvette sans bas-fond central	8826	2	15941	82.4	46.3

Aussi, il faut préciser que toutes les cuvettes à sol nu de natron sont occupées par une nappe d'eau superficielle temporaire durant la saison des pluies. Cependant, vers la fin de la saison des pluies, le bas-fond central de cuvette est occupé par une nappe superficielle et une ceinture de plage natronnée. Ainsi, une cuvette peut donc regorger en même temps d'une nappe d'eau superficielle et de natron. Les cuvettes à bas-fond central occupé par une nappe d'eau superficielle sont au nombre de 1891 (tableau 21). Elles

représentent 17.6 % de l'ensemble des cuvettes. Malgré l'effectif relativement faible de ces cuvettes, on remarque qu'elles occupent 53.7 % de la superficie totale des cuvettes. Ces cuvettes sont donc généralement de grande taille.

Il y a une certaine logique entre ces résultats car la présence d'un bas-fond central de cuvette à nappes d'eau superficielle et/ou à sols nus à natron est liée à la topographie. Pour qu'il y ait du natron, il faut de l'eau en surface ou à faible profondeur qui puisse alimenter les phénomènes de remontée capillaire. Et de ce point de vue, les cuvettes qui ont des bassins topographiques plus grands accumulent davantage d'eau. Il y a ainsi une forte probabilité pour qu'on trouve plus fréquemment les concentrations de natron dans les grandes cuvettes que dans les petites. Les petites cuvettes sont des petits bassins qui accumulent peu d'eau sauf s'il y a en dessous une nappe d'eau peu profonde. Mais en règle générale, il est peu probable qu'il y ait une nappe peu profonde dans les petites cuvettes parce que la dénivellation du fond de la cuvette dépend aussi de la taille. Il y a une interaction entre la dénivellation, autrement dit le creusement de la cuvette avec sa taille. Les grandes cuvettes sont généralement plus creusées et ont des points bas plus proches de la nappe souterraine que les petites.

Les portions des bas-fonds de cuvette à nappes d'eau superficielles ou/et à plages de natron sont ainsi souvent des indicateurs qui renseignent sur le niveau de la nappe phréatique d'une cuvette. Les cuvettes à nappe d'eau superficielle ou à sol nus de natron ont une nappe phréatique affleurante à sub-affleurante (moins d'1 m) au niveau des unités paysagères proches du bas-central de cuvette. Cette nappe devient un peu plus profonde (1 à 3 m) au fur et à mesure que l'on remonte vers la terrasse basse de la cuvette. À proximité des unités de la terrasse moyenne de cuvette, elle devient profonde ou très profonde selon les cuvettes (supérieure à 3 m). Une cuvette à eau affleurante caractérise donc la présence d'une nappe phréatique peu profonde qui affleure au niveau du bas-fond central des cuvettes. Cet affleurement permet d'une part la mise en valeur sans avoir recours à l'irrigation permanente des unités de la basse terrasse ; d'autre part, elle permet l'exploitation du natron qui semble être la seule aptitude des sols de bas-fond central à sols nus de natron et/ou à nappe d'eau superficielle. La production du natron peut être conduite de manière plus soutenue par stimulation de la remontée des sels en procédant à

des arrosages successifs là où cela est possible (Ambouta, 2006) ou en raclant la croûte salée pour rouvrir les capillaires comme cela est souvent fait par les exploitants. Le natron est prélevé pour servir de sel à lécher aux animaux domestiques et surtout de matière première dans les industries (tanneries, savonneries, etc.). Il est écoulé sur les marchés locaux et distribué aussi bien à l'intérieur du pays que vers le Nigeria voisin.

#### **IV.2.2. Indicateurs spatiaux de caractérisation des cuvettes**

Les indicateurs spatiaux de caractérisation sont appliqués à des écosystèmes de cuvette oasisienne dans cette étude. Ces indicateurs sont de deux groupes : les indicateurs de potentiel agricole valorisable et les indicateurs de contraintes.

##### ***IV.2.2.1. Les potentialités des unités de paysages de cuvettes***

Les cuvettes du Département de Gouré regorgent de potentialités valorisables d'autant plus appréciées que leur environnement est très contraignant. Elles contiennent plusieurs unités de paysages dont les potentialités agricoles diffèrent.

Ainsi, les surfaces cultivables des cuvettes représentent 5726 ha soit 16.4% en superficie (tableau 22). On note 46% des cuvettes à pourcentage des superficies cultivables de cuvette (PSCC) faible et 4% fort ou très fort. Les cuvettes à PSCC nul sont en général petites comme en témoigne leur taille unitaire moyenne.

Les cuvettes à valeur de PSCC faible disposent de basses terrasses occupées par une forte concentration d'*Hyphaene thebaïca* souvent associé au *Phoenix dactylifera*, *Pilostigma reticulatum*, *Acacia spp* ou envahies par *Prosopis juliflora*.

Tableau 22 - Typologie et superficies moyenne et totale des cuvettes oasiennes obtenues suivant le pourcentage des superficies cultivables de cuvette (PSCC)

<b>PSCC</b>	<b>Nombre de cuvettes</b>	<b>Superficie moyenne par cuvette (ha)</b>	<b>Superficie unitaire par des cuvettes (ha)</b>	<b>Superficie totale des cuvettes (ha)</b>
Nul	4002	1		4762
Faible	4907	5		23006
Moyen	1384	4		5433
Fort	307	3		931
Très fort	116	3		360

42% des superficies cultivables des cuvettes sont exploitées en culture maraîchère (tableau 23). En moyenne, 7% de l'ensemble des cuvettes sont mises en culture à 12.5% de leur capacité, 8 % à 37.5 % et 19 % à 87.5%. On note cependant 1445 (13%) cuvettes oasiennes qui sont mises en culture à 100 % de leur capacité. Ce fort taux d'exploitation agricole des cuvettes par rapport à leur capacité est lié d'abord à la proximité avec les villages ensuite le faible niveau de la nappe phréatique et enfin le groupe ethnique utilisant la cuvette. Notons la population du Département est composée en majorité par des Kanouri qui sont des agriculteurs, ensuite viennent les peulhs, véritables pasteurs nomades disséminés un peu partout dans le département.

Tableau 23 - Typologie et superficies moyenne et totale des cuvettes oasiennes obtenues suivant le niveau d'exploitation des surfaces cultivables (NESC)

<b>NESC</b>	<b>Nombre de cuvettes</b>	<b>Superficie cultivable moyenne par cuvette (ha)</b>	<b>Superficie cultivable totale (ha)</b>	<b>Superficie totale des cuvettes (ha)</b>
Nul	6194	0.07	449	8169
Faible	748	1.14	846	4681
Moyen	871	1.30	1125	6186
Fort	815	2.19	1774	7912
Très fort	2089	0.71	1476	7545

On estime le niveau d'exploitation agricole moyenne des cuvettes du Département de Gouré à 52.8%. Ce qui correspond à 2670 ha de surfaces cultivables de cuvette non exploitées dans le Département. 58 % des cuvettes du Département totalisant 449 ha de superficies cultivables non exploitées ont un niveau d'exploitation des surfaces cultivables de cuvette (NESC) égal à zéro. Ces cuvettes non exploitées en culture irriguée sont le plus souvent fréquentées par les éleveurs qui y font pâturer leurs troupeaux de petits et grands ruminants. Ces lieux sont aussi privilégiés par les agriculteurs et les éleveurs pour les prélèvements du bois de chauffe et de matières premières (palmes et folioles de doum) pour les activités de sparteries (Jahiel, 1998). La plupart des cuvettes situées au nord-est et nord-ouest de la zone sont inexploitées à cause du niveau profond de la nappe phréatique.

L'essentiel des unités de paysage des cuvettes est constitué par des surfaces boisées. Le pourcentage des surfaces boisées a permis de faire des classes de cuvettes (tableau 24). Ainsi, 62 % des cuvettes du Département de Gouré ont un pourcentage de surfaces boisées de cuvette (PSBC) compris entre 75 et 100%. C'est-à-dire que ces cuvettes ont des capacités élevées à produire du bois de chauffe, des poutres pour la construction des maisons et hangars. Cependant 12% des cuvettes représentant 12% de la superficie totale des cuvettes (3861 ha) ont un PSBC situé entre 0 et 50%.

*Tableau 24 - Typologie et superficies moyenne et totale des cuvettes oasiennes obtenues suivant le pourcentage des surfaces boisées de cuvette (PSBC)*

<b>PSBC</b>	<b>Nombre de cuvettes</b>	<b>Superficie moyenne par cuvette (ha)</b>	<b>Superficie totale des cuvettes (ha)</b>
Nul	93	1.7	152
Faible	292	3.5	1002
Moyen	950	2.9	2707
Fort	2782	4.7	12898
Très fort	6600	2.7	17733

Les valeurs de PSBC fort et très fort s'expliquent par une colonisation progressive des cuvettes inexploitées par les végétaux ligneux, essentiellement par des palmiers doums et des palmiers dattiers (Jahiel, 1993, 1998). La connaissance du PSBC dans cette zone permet de déterminer les cuvettes qui renferment des potentialités en *Hyphaene thebaica*. En effet, les feuilles et fruits d'*Hyphaene thebaica* génèrent des circuits de commercialisation très prépondérants au niveau dans la zone d'étude (DRE/Zinder, 2010).

Ce sont des sous-produits qui font faire de bonnes affaires pour certains acteurs locaux. La filière feuilles et fruits du palmier doum est bien développée. Ils sont exploités et vendus sur les différents marchés locaux (Guidiguir, Soubdou, Kazoé....) qui desservent les marchés régionaux (Agadez, Tahoua et Niamey). Les feuilles sont vendues sous forme de fagots au niveau des marchés locaux. Quant aux fruits, la drupe à l'état sec est utilisée pour la pharmacopée et les pratiques culinaires. Après concassage de la drupe, la poudre obtenue donne un goût spécial aux galettes à base de farine de mil ou de riz.

D'après les relevés de terrain au niveau de six cuvettes (Gassafa, Kantou, Gachaké, Kilakina et N'guiguigué), dans les unités de moyenne et basse terrasses de cuvette, le palmier doum forme un peuplement mono-spécifique avec des densités allant de 600 à 1000 pieds à l'hectare et un recouvrement variant de 70 à 100 % surtout au niveau de la couronne externe des cuvettes.

#### ***IV.2.2.2. Les contraintes des cuvettes***

L'ensablement des cuvettes est une conséquence de l'érosion éolienne et est à la base de la dégradation des ressources naturelles. Les indicateurs de contraintes sont de deux ordres : les indicateurs de dégradation des cuvettes et les indicateurs de risque d'ensablement des cuvettes.

##### ***IV.2.2.2.1. Indicateur de dégradation des cuvettes***

La classification des cuvettes en fonction des valeurs du pourcentage des surfaces de dépôt sableux des cuvettes (PSDSC) distingue deux classes de cuvette (tableau 25) : les cuvettes à PSDSC faible (0 à 15%) représentent 24.6 % des cuvettes et celles à PSDSC moyen (15 à 30%), 10.6 %.

Les surfaces de dépôts sableux s'expliquent essentiellement par deux modes d'ensablement : l'ensablement par des lobes éoliens d'invasion et par apports favorisés par écoulements sableux le long des sentiers des troupeaux (Kanembou, 2007). Les lobes d'invasion aussi bien que les coulées de sables ensevelissent les cuvettes surtout aux endroits de végétation éparses ou dans les couloirs provoqués par les passages répétés des animaux. L'ensablement par le piétinement des animaux est pluridirectionnel, car il suit le sens des passages des animaux. En plus, le piétinement prépare le matériel à l'érosion hydrique et éolienne.

*Tableau 25 - Typologie et superficies moyenne et totale des cuvettes oasiennes obtenues suivant le pourcentage des surfaces de dépôt sableux des cuvettes (PSDSC)*

<b>PSDSC</b>	<b>Nombre de cuvettes</b>	<b>Superficie unitaire moyenne par cuvette (ha)</b>	<b>Superficie totale des cuvettes (ha)</b>
Nul	6944	2	12903
Faible	2640	7	18271
Moyen	1133	3	3319

#### *IV.2.2.2.2. Indicateur de menace d'ensablement des cuvettes*

L'analyse des surfaces ravivées de dunes des alentours de cuvette a permis d'évaluer les indicateurs de menace d'ensablement des cuvettes à terme immédiat et à moyen terme.

Cinq classes de menace de cuvettes à terme moyen ont été discriminées (tableau 26). Les classes de cuvettes à menace d'ensablement fort et très fort à moyen terme couvrent une superficie totale de 1204 ha soit 3.5% des cuvettes. Elles ont une taille unitaire moyenne de 3.8 ha. Celles à menace d'ensablement faible à moyen terme sont plus nombreuses (72%) et occupent plus de surface (71%). Cependant, parmi ces cuvettes à menace d'ensablement dans le moyen terme, on observe par interprétation visuelle d'images SPOT 5-THX des surfaces ravivées qui sont situées à moins de 500m des cuvettes.

*Tableau 26 - Typologie et superficie moyenne et totale des cuvettes oasiennes obtenues suivant le pourcentage de surfaces ravivées de dune dans une zone tampon entre 500 et 1000 m des cuvettes (PSRDVA<sub>500-1000m</sub>)*

<b>PSRDVA<sub>500-1000m</sub></b>	<b>Nombre de cuvettes</b>	<b>Superficie unitaire moyenne par cuvette (ha)</b>	<b>Superficie totale des cuvettes (ha)</b>
Nul	2616	3	8910
Faible	6884	3	21368
Moyen	866	4	3010
Fort	316	3	1049
Très fort	37	4	155

L'analyse du pourcentage des surfaces ravivées dans une zone tampon de 0 à 500 m autour des cuvettes a discriminé les classes de menace d'ensablement de cuvette à terme immédiat (tableau 27). En effet, les classes de cuvettes à menace d'ensablement fortes et très fortes à terme immédiat sont relativement peu nombreuses dans la zone d'étude. Elles concernent 3.8% de l'effectif des cuvettes et seulement 3.8 % des superficies totales des cuvettes.

*Tableau 27 - Typologie et superficie moyenne et totale des cuvettes oasiennes obtenues suivant le pourcentage de surfaces ravivées de dune dans une zone tampon de 0 à 500 m autour des cuvettes(PSRDVA<sub>500m</sub>)*

<b>PSRDVA<sub>500m</sub></b>	<b>Nombre de cuvettes</b>	<b>Superficie unitaire moyenne par cuvette (ha)</b>	<b>Superficie totale des cuvettes (ha)</b>
Nul	3602	3	11135
Faible	5946	3	19325
Moyen	765	4	2709
Fort	321	3	1065
Très fort	84	3	258

Les édifices dunaires à surfaces ravivées de cuvettes nécessitent une intervention rapide afin de protéger ces unités de paysage fragiles (PLECO, 2010). L'érosion éolienne est à la base de la création de ces surfaces ravivées. Elle se manifeste par la déflation, le transport et le dépôt des sables (Mainguet et Callot, 1978). L'action anthropique est un facteur favorisant la réactivation en dunes vives comme en témoigne les traces d'activités anthropiques observées sur le terrain. Dans la zone d'étude, plusieurs travaux ont montré que les dunes vives sont apparues dans les années 70 (Bodart et Ozer, 2009; Bodart *et al.*, 2010). Les dunes vives constituent les zones sources des sables mobilisés. En effet, en plus des cuvettes, les aires de pâturages, les champs de cultures dunaires, les points d'eau, les villages et les infrastructures socio-économiques sont aussi menacés par le phénomène d'ensablement.

Ces informations permettent de dire que la menace d'ensablement des cuvettes est bien fonction de la distance de la dune vive par rapport à la cuvette. Cependant, il faut noter que ce sont surtout les dunes vives situées dans les zones tampons orientées selon les secteurs d'origine des vents dominants d'Harmattan nord-est à sud-ouest) qui menacent le plus les cuvettes. C'est pourquoi les cuvettes oasiennes situées sous le vent dominant d'Harmattan d'une dune vive sont beaucoup plus exposées à l'ensablement (Tidjani *et al.*, 2009a,b). C'est-à-dire la présence de dunes vives au nord-est d'une cuvette (au vent d'Harmattan), constitue un risque quasi certain d'ensablement direct de la cuvette.

### **Conclusion partielle**

Cette étude à l'échelle des unités paysagères des cuvettes et de leurs paysages associés a permis en plus des indicateurs spatiaux de caractérisation, de déterminer les potentialités et les contraintes de l'ensemble des cuvettes oasiennes du Département de Gouré. Trois grands potentiels exploitables ont été identifiés en terme de surfaces : les surfaces cultivables de cuvette (16.4%), les surfaces boisées de cuvette (72.2 %) et les surfaces de sols nus à natron et/ou nappe d'eau superficielle (4.3 %). Ces potentialités naturelles pourraient permettre d'amorcer le développement durable du Département de Gouré si les ressources sont précisément évaluées en ressources (sols, eau, biomasse) afin de constituer les bases d'une gestion plus efficace et durable.

Les indicateurs de menaces de dégradation des cuvettes ont discerné des classes de menace d'ensablement des cuvettes à moyen terme et à terme immédiat. Ainsi, il y a des risques pour certaines cuvettes et c'est là qu'il faut agir en premier lieu.

L'ensablement constitue une menace qui pèse sur les cuvettes du Département. Cette menace spectaculaire est constituée par d'énormes fronts dunaires ravivés d'une ampleur très inquiétante qui ensevelissent tout sur leur passage. Ces cuvettes oasiennes constituent pourtant des agro- systèmes incontournables pour la survie des populations locales riveraines.

Le Chapitre V qui suit est consacré à la bonne compréhension des tendances d'ensemble animant ces cuvettes et leurs alentours. Ce chapitre analyse l'évolution des unités de paysages associés aux cuvettes et celle des paysages de cuvettes de 1984 à 1996, puis 2013.

## **CHAPITRE V. ANALYSE DE L'ÉVOLUTION DES PAYSAGES DE CUVETTES OASIENNES ET DE LEURS ALENTOURS**

### **Introduction**

Le présent chapitre est une suite logique du Chapitre IV dans lequel une situation de référence d'occupation des sols autour et à l'intérieur des cuvettes oasiennes est établie en 2013. Cette situation a permis d'identifier l'état actuel des unités de paysages de cuvettes et des paysages associés aux cuvettes. Les objectifs de ce chapitre visent à évaluer :

- l'ampleur de l'évolution des superficies et du nombre de cuvettes de 1984 et de 1996 par rapport à l'année de référence 2013 ;
- l'évolution de l'occupation des sols des alentours des cuvettes de 1984 et de 1996 par rapport à l'année de référence de 2013.

### **V.1. DONNÉES ET MÉTHODES DE TRAITEMENT**

#### **V.1.1. Données satellitaires**

Les images satellitaires constituent des documents de base à la réalisation des cartes historiques d'occupation des sols. À partir des images, on peut extraire des informations sur les limites des unités d'occupation des sols, leur taille et leur position géographique. Les types d'images satellitaires qui ont servi à cette étude sont : six scènes d'images de SPOT 5-THX, sept scènes d'images de SPOT 3 et quatre scènes d'images de LANDSAT5-TM (tableau 28).

#### **V.1.2. Méthodes d'établissement et d'évolution de la situation d'occupation des sols des unités de paysages de cuvettes et de leurs alentours à partir des données satellitaires**

##### ***V.1.2.1. L'extraction de la zone d'étude***

La zone d'étude est représentée par l'aire des cuvettes oasiennes du Département de Gouré (figure 2). Une couronne d'un kilomètre de largeur autour de chaque cuvette a été délimitée. Cette zone correspond à l'alentour de cuvette (Cf. Chapitre IV)

Tableau 28 - Caractéristiques des images satellitaires utilisées

Données	Landsat5	Spot 3	Spot 5
Dates d'acquisition	Octobre 1984	Octobre 1996	Octobre - Novembre 2013
Nombre de bandes	7	3	3
Capteur	TM	HRV	HRG
Résolution spatiale (m)	30	20	2.5
Bandes spectrales (µm)	TM1 0.45-0.56 TM2 0.52-0.60 TM3 0.63-0.69 TM4 0.76-0.90 TM5 1.55-1.75 TM6 10.04-12.5 TM7 2.10-2.35	XS1 0.50-0.59 XS2 0.61-0.68 XS3 0.78-0.89	B1 0.50-0.59 B2 0.61-0.68 B3 0.78-0.89

### V.1.2.2. L'analyse des données

#### V.1.2.2.1. Etablissement de la nomenclature

La nomenclature ou clé d'interprétation définit les différentes classes d'occupation des sols et leurs caractéristiques spectrales. Dans ce chapitre, la clé d'interprétation élaborée dans le Chapitre IV qui caractérise les unités de paysages de cuvettes et de leurs alentours a été conservée. Concernant les alentours de cuvettes, la clé d'interprétation est composée par les cinq (5) classes suivantes : (1) colline à affleurement rocheux, (2) édifice dunaire et vallée sèche à culture pluviale, (3) édifice dunaire à surfaces ravivées, (4) édifice dunaire et vallée sèche à steppe arborée et (5) édifice dunaire à steppe arbustive. La clé utilisée pour identifier les cuvettes oasiennes est constituée de : cuvettes, vallées sèches, édifices dunaires et collines (voir Chapitre II).

#### *V.1.2.2.2. Interprétation des images*

La classification des images est basée sur l'analyse par objet. Les étapes de cette classification par objet ont déjà été décrites dans le Chapitre 2.

Pour éviter des confusions entre les cuvettes et leurs alentours, un premier traitement a permis d'identifier les cuvettes oasiennes par analyse automatique d'images satellitaires. Le deuxième traitement a déterminé les unités de paysages associées aux cuvettes oasiennes.

#### ***V.1.2.3. La méthode d'analyse de l'évolution des classes d'occupation des sols établies sur la base de la clé d'interprétation***

La méthodologie adoptée, pour bien cerner l'évolution des unités de paysages des alentours des cuvettes ainsi que celle des cuvettes, procède « en remontant le temps » à partir de la période actuelle (2013) ou période de référence jusqu'à la période la plus ancienne (1984). Les données d'occupation des sols de 2013 constituent la trame de référence, la forte résolution des images ayant permis de faire une bonne situation de référence de l'occupation des sols. De plus, la période actuelle a également fait l'objet d'un contrôle de terrain de l'occupation des sols. Cette situation sert donc à fixer les points de références indispensables pour évaluer les changements en faisant les comparaisons avec les situations d'avant, ce qui permet de tirer des conclusions sur l'efficacité des actions menées pour stabiliser ces paysages. Ces états rétrospectifs permettent également de s'enfoncer dans l'histoire des unités de paysages des cuvettes et de leurs alentours avec les repères indispensables à leur compréhension et leur exploitation. L'évolution des classes d'occupation de sols permet de ressortir la dynamique des cuvettes et de leurs alentours. Il a été procédé à l'analyse de l'évolution sur trois périodes : 1984-2013 ; 1984-1996, 1996-2013. L'année 1984 est considérée comme la première année à données utilisables pour cette étude parce que les images plus anciennes ont une résolution trop grossière (80 m). Les taux d'évolutions des superficies des unités de paysages des cuvettes et de leurs alentours entre deux années sont obtenus en faisant la différence entre la classe de la période actuelle ( $P_a$ ) et la période initiale ( $P_i$ ) divisée période initiale ( $P_i$ ), le tout multiplié par 100.

### V.1.3. L'évaluation des classifications réalisées

Pour l'évaluation les résultats des classes d'occupation des sols des alentours des cuvettes de 1984 et 1996, le même jeu de critères de validation qui a servi à réaliser les matrices de confusion dans le Chapitre 3 a été utilisé. Différents indicateurs de précision sont calculés: coefficient Kappa, précision globale, précision pour l'utilisateur et précision pour le réalisateur (Congalton, 1991; Fleiss et Cohen, 1973).

Les résultats d'identification des cuvettes ont été aussi validés à travers un modèle de prédiction (tableau 2). Les points de contrôle utilisés pour évaluer les performances de ces trois méthodes de détection des cuvettes oasiennes sont composés de 605 cuvettes oasiennes échantillonnées dont 164 déterminés sur le terrain et 441 par interprétation visuelle d'images SPOT 5-THX.

## V.2. RÉSULTATS ET DISCUSSIONS

### V.2.1. Résultats de la validation des classifications d'image

L'évaluation des résultats des unités d'occupation des sols des alentours des cuvettes à travers une matrice de confusion donne une précision globale satisfaisante (supérieure à 95%) pour les trois situations (2013, 1996 et 1984).

En ce qui concerne l'indice critique de succès, qui prend en compte le taux de faux positifs (cuvettes détectées mais non observées) et de faux négatifs (cuvettes observées mais non détectées par la méthode), il est 0.94 pour les cuvettes oasiennes détectées en 2013, 0.93 pour celles de 1996 et 0.94 en 1984 (tableau 29). Il faut rappeler qu'une cuvette est dite « détectée » lorsque la taille de la fusion des objets qui la composent est supérieure à 0.2 ha.

*Tableau 29 - Calcul de l'indice critique de succès (CSI), de la probabilité de détection (POD) et du taux de faux positifs (TFP)*

	DC	RC	FN	FP	N	POD (%)	TFP (%)	CSI
<b>1984</b>	543	0	8	27	578	98	5	0.94
<b>1996</b>	577	0	12	29	614	98	4	0.93
<b>2013</b>	600	0	5	33	638	99.2	6.5	0.94

En rappelle, DC, RC, FN, FP et N représentent respectivement les détections correctes, les rejets corrects, les faux négatifs, les faux positifs et le total détecté ou observé.

## **V.2.2. Évolution des paysages de cuvettes et leurs alentours de 1984 à 2013**

Les évolutions de 1984 à 2013 des unités des paysages des cuvettes et de leurs alentours sont présentées respectivement par les tableaux 30 et 31. Il s'est agi de comparer :

- des unités de paysage des cuvettes oasiennes et de leurs alentours entre 1984 et 1996 ;
- des unités de paysage des cuvettes oasiennes et de leurs alentours entre 1996 et 2013 ;
- des unités de paysage des cuvettes oasiennes et de leurs alentours entre 1984 et 2013.

### ***V.2.2.1. Les unités d'occupation des sols des paysages associés aux cuvettes***

Les superficies des unités d'édifices dunaires et de vallées sèches à steppe arborée ont régressé de 35.5 % de 1984 à 2013 (tableau 30). La proportion de cette régression est de 34.5 % de 1984 à 1996. La steppe arborée couvrait en 1984, 11.4% des alentours des cuvettes de la zone d'étude, 6.4% en 1996 et seulement 5.3% en 2013. Cette steppe arborée est localisée généralement dans les vallées sèches mais des peuplements denses par endroits se rencontrent sur les édifices dunaires. La végétation est composée majoritairement par *Acacia spp* et *Hyphaene thebaïca*.

La diminution de la steppe arborée se fait au profit des zones de cultures. Les causes de cette extension des zones de cultures sont liées aux aléas du climat et surtout aux actions anthropiques (Kanembou, 2007). En effet, les déficits pluviométriques enregistrés au cours de ces dernières décennies ont contribué à la réduction de la steppe arborée. Mais les principales causes sont anthropiques. Elles s'expriment par l'emprise de l'homme sur les ressources végétales (déboisement, défrichements agricoles, etc.) d'une part et par les pratiques pastorales d'autre part. De plus la croissance démographique conduit à la conquête de nouvelles terres de cultures, au détriment des steppes arborées, à une surexploitation des ressources végétales : coupe abusive de bois, défrichage, feux de brousse,...etc.

Tableau 30 - Evolution de la superficie des unités paysagères des alentours des cuvettes oasiennes de la zone d'étude de 1984 à 2013

Unités paysagères des alentours de cuvettes	1984 (ha)	1996 (ha)	2013 (ha)	Evolution 1984-1996	Evolution 1996-2013	Evolution 1984-2013
Édifice dunaire et vallée sèche à steppe arborée	60174	39394	38827	-34.5 % -20780 ha	-1.4 % -567 ha	-35.5 % -21347 ha
Édifice dunaire à steppe arbustive	153624	168675	230799	9.8 % 15051 ha	36.8 % 62124 ha	50.2 % 77175 ha
Colline affleurement rocheux	1252	1285	1619	2.6 % 34 ha	26 % 334 ha	29.3 % 367 ha
Édifice dunaire et vallée sèche à culture pluviale	295697	368153	423876	24.5 % 72456 ha	15.1 % 55723 ha	43.3 % 128179 ha
Édifice dunaire à surface ravivée	17967	33690.61	32123	87.5 % 15723 ha	-4.7 % -1568 ha	78.8 % 14156 ha

Les unités d'édifice dunaire à steppe arbustive ont connu une augmentation de 50 % de leurs superficies entre 1984 et 2013. En effet, les superficies ont augmenté de 36.8 % entre 1996 et 2013 et de 9.8 % entre 1984 et 1996. Les unités d'édifice dunaire à steppe arbustive ont une superficie estimée à 29 % des superficies totales des alentours des cuvettes en 1984, 28 % en 1996 et 32 % en 2013.

Les affleurements rocheux couvrent 0.24 % de la superficie totale des alentours des cuvettes en 1984, 0.21 % en 1996 et 0.22% en 2013. Ces unités ont augmenté de 367 ha entre 1984 et 2013. Une raison pouvant expliquer les changements observés serait liée à la résolution des images qui diffère selon les trois(3) périodes suivies. Ces affleurements rocheux sont localisés dans la zone de socle du département de Gouré représenté par les collines granitiques du massifs du Mounio.

Dans l'ensemble, les unités d'édifice dunaire à surface ravivée de 1984 ont affiché une tendance à la hausse de 78.8 % par rapport à celles de 2013. Ces unités ont surtout progressé de 87.5 % pour la période 1984-1996. Ainsi, les surfaces ravivées représentaient 3.4 % de la superficie totale des alentours des cuvettes en 1984, 5.5% en 1996 et 4.2 % en 2013. L'évolution des dunes vives de 1996 à 2013 corrobore certaines études au Sahel (Sendzimir *et al.*, 2011) soutenant au cours de ces dernières années un reverdissement des paysages en certains endroits. Ceci expliquerait la réduction des dunes vives de 4.7 % entre 1996 et 2013. Cette réduction peut s'expliquer aussi par les impacts des actions de fixation des dunes réalisées dans cette zone.

Dans le département de Gouré, les zones de cultures localisées autour des cuvettes ont aussi connu une augmentation de 43.3 % entre 1984 à 2013. Cette augmentation est de 24.5 % entre 1984 et 1996. L'augmentation des superficies cultivées dans les zones alentours des cuvettes entre 1984 et 2013 (et entre 1996 et 2013) s'explique par le taux d'accroissement de la population (3.3% d'après INS, 2014) qui fait que la population a doublé durant la période d'étude. En plus, la baisse de la pluviométrie a entraîné celle de la production agricole, obligeant ainsi les agriculteurs à de nouvelles stratégies de cultures, notamment, l'intensification de la mise en culture des terres dunaires, avec pour conséquence une extension des champs (Kanembou, 2007). Les zones de cultures occupent la plus forte proportion des alentours des cuvettes de la zone

d'étude. Elles totalisent 295697 ha (56 %) en 1984, 368153 ha (60 %) en 1996 et 423876 ha (58 %) en 2013. Ces cultures se pratiquent sur les sols sableux au niveau des édifices dunaires et sur des sols sablo-limoneux ou argileux pour les vallées sèches. Le problème de l'extension des terres de cultures se pose de plus en plus du fait que le nombre d'exploitants augmente car les difficultés financières font que certains éleveurs se convertissent en agriculteurs.

### ***V.2.2.2. Les unités de paysages de cuvettes***

Les superficies des cuvettes oasiennes qui représentaient 46783 ha en 1984 étaient de 40831 ha en 1996 et de 34553 ha en 2013 soit une diminution de 15.4 % pour la période 1996-2013 et de 26.1 % pour la période 1984-2013 (tableau 31).

Contrairement à la superficie des cuvettes, le nombre des cuvettes a augmenté entre 1984 à 2013. Ainsi, 16.9 % du nombre total des cuvettes identifiées en 2013 sur les images SPOT 5-THX de 2.5 m de résolution n'ont pas été détectés sur les images Landsat5-TM de 30 m résolution de 1984. Aussi, 4.4 % des cuvettes identifiées sur du SPOT 3 de 20 m de résolution de 1996 ne sont pas discernables sur les images Landsat 5-TM de 30 m résolution de 1984.

*Tableau 31 - Evolution de la superficie et du nombre des cuvettes oasiennes de la zone d'étude de 1984 à 2013*

	<b>1984</b>	<b>1996</b>	<b>2013</b>	<b>Evolution 1984-1996</b>	<b>Evolution 1996-2013</b>	<b>Evolution 1984-2013</b>
<b>Nombre de cuvettes</b>	8911	9326	10717	4.6 % 415	-14.9 % 1391	20.3 % 1806
<b>Superficie totale (ha)</b>	46783	40831	34553	-12.7 % -5953 ha	-15.4 % -6278 ha	-26.1 % -12230 ha

### **V.2.3. Analyse spatiale des causes d'augmentation du nombre des cuvettes oasiennes et de réduction de leurs superficies**

La figure 44 montre l'évolution et la répartition de la taille et du nombre des cuvettes de 1984 à 2013. L'essentiel des cuvettes de taille inférieure à 0.5

ha s'observent en 2013. On note ainsi une augmentation de 1377 cuvettes de taille inférieure à 0.5 ha entre 1996 et 2013 pour un total de 1391 nouvelles cuvettes sur cette période, 1264 cuvettes entre 1984 et 1996 pour 415 nouvelles cuvettes apparues durant la période. 2641 cuvettes représentent la différence du nombre de cuvettes observées entre 1984 et 2013 pour 1806 nouvelles cuvettes sur cette période.

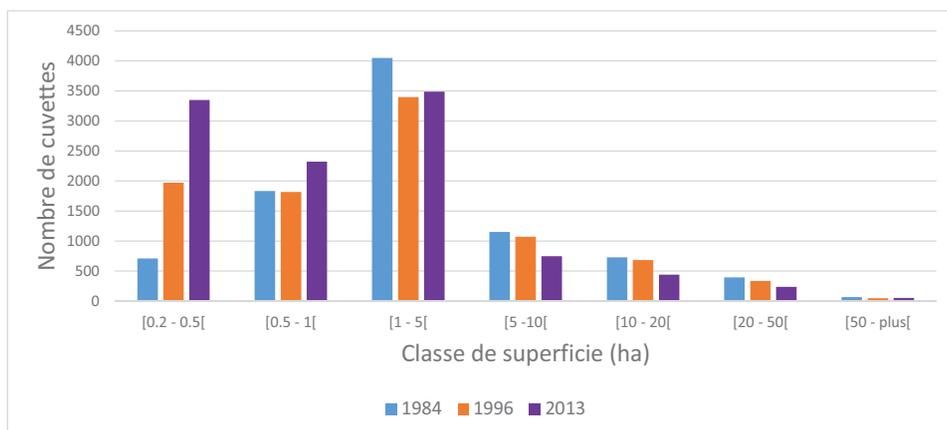


Figure 44 - Évolution de la distribution du nombre des cuvettes de la zone d'étude de 1984 à 2013

Quant aux cuvettes de taille supérieure à 1 ha, elles étaient numériquement plus nombreuses en 1984 puis en 1996. Cela voudrait dire qu'en 1984 il y avait plus de grandes cuvettes qu'aujourd'hui. A cette période, la végétation était relativement stable autour des cuvettes comme en témoignent les proportions des édifices dunaires et vallées sèches à steppe arborée qui se sont réduites de 11 % en 1984 à 5 % en 2013.

L'évolution et la répartition des classes de superficies des cuvettes de 1984 à 2013 selon la taille (figure 45) montrent une augmentation des superficies totales des cuvettes de tailles comprises entre 0.2 et 0.5 ha et de 0.5 à 1 ha de 1984 à 2013. Cette augmentation peut s'expliquer par le nombre de cuvettes de taille inférieure à 0.5 ha qui est plus important en 2013 qu'en 1996 et 1984 (figure 44). Cependant, les cuvettes de taille supérieure à 1 ha, ont connu une réduction de leur superficie totale. Elles occupent une superficie de 35855 ha en 1984, 30497 ha en 1996 et 21869 ha en 2013 soit une différence de 5358

ha entre 1984 et 1996, 8628 ha entre 1996 et 2013 et 13986 ha entre 1984 et 2013.

La figure 45 confirme les résultats de la figure 44 et explique aussi les changements des superficies totales des cuvettes pour les périodes 1984-2013, 1984-1996 et 1996-2013. Ainsi la réduction des superficies totales des cuvettes de 1984 à 2013 peut s’expliquer par une diminution de la taille des cuvettes.

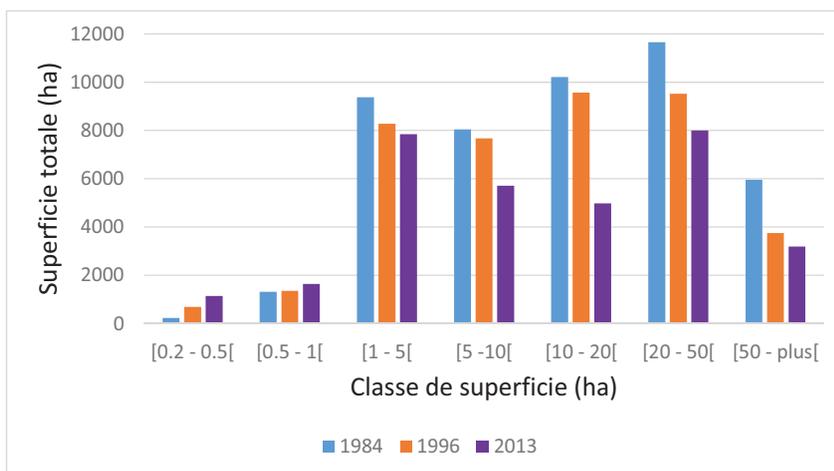


Figure 45 - Évolution de la distribution des superficies des cuvettes de la zone d’étude de 1984 à 2013

Les cuvettes oasiennes à l’est (figure 46) et à l’ouest (figure 47) détectées en 1984, en 1996 et en 2013 dans la zone d’étude sont superposées respectivement sur les images Landsat 5-TM, SPOT 3 et SPOT 5-THX afin d’observer leur évolution. Ces figures ont permis de valider par analyse visuelle des images, les causes de l’augmentation du nombre des cuvettes et la réduction de leur superficie de 1984 à 2013. Sur les figures 46 et 47, la taille des cuvettes de 1984 (340 ha) est plus grande que celle de 1996 (232 ha) qui à leur tour est supérieure à celle de 2013 (185 ha).

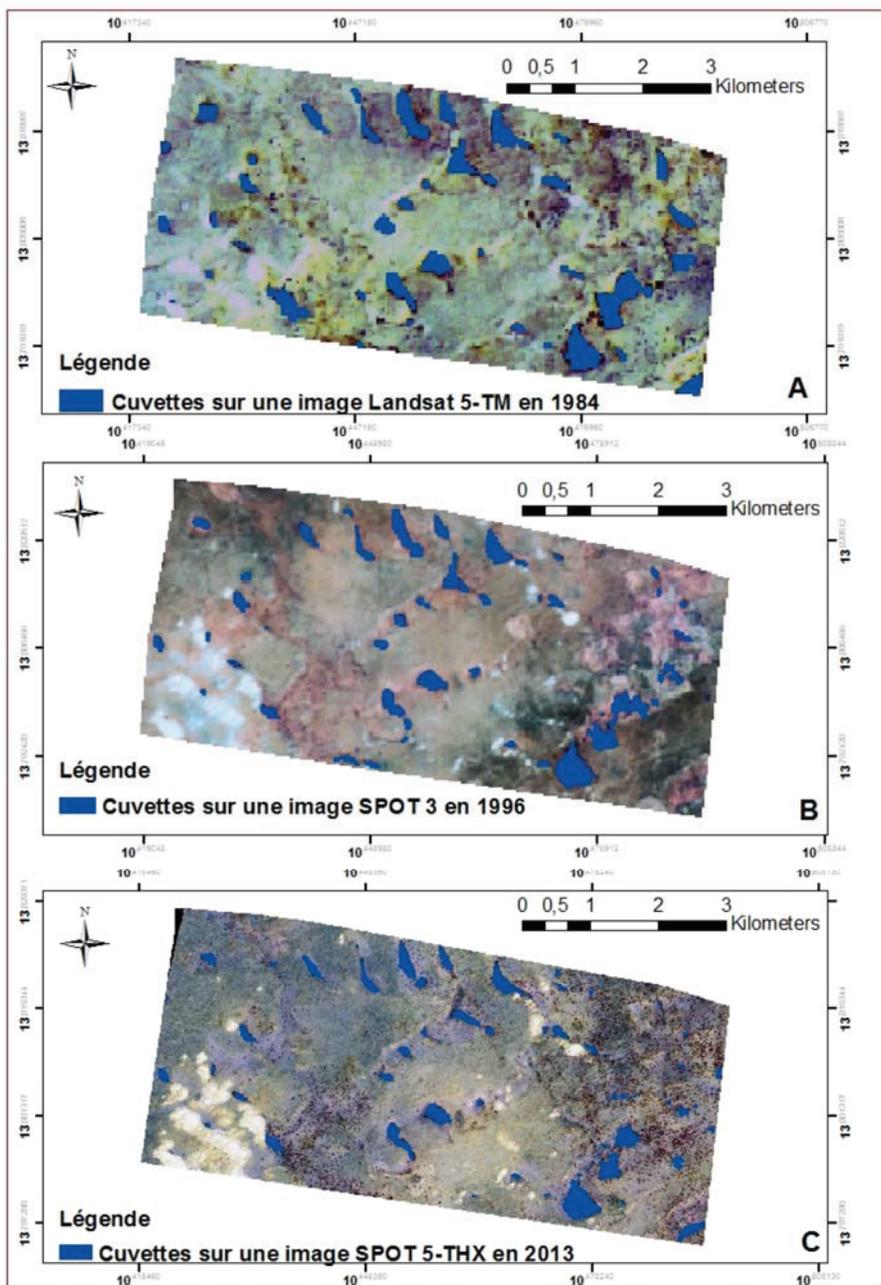


Figure 46 - Évolution des cuvettes oasiennes identifiées par classification d'image sur des images Landsat en 1984 (A), SPOT 3 en 1996 (B) et SPOT 5 en 2013 (C) à l'est du Département de Gouré

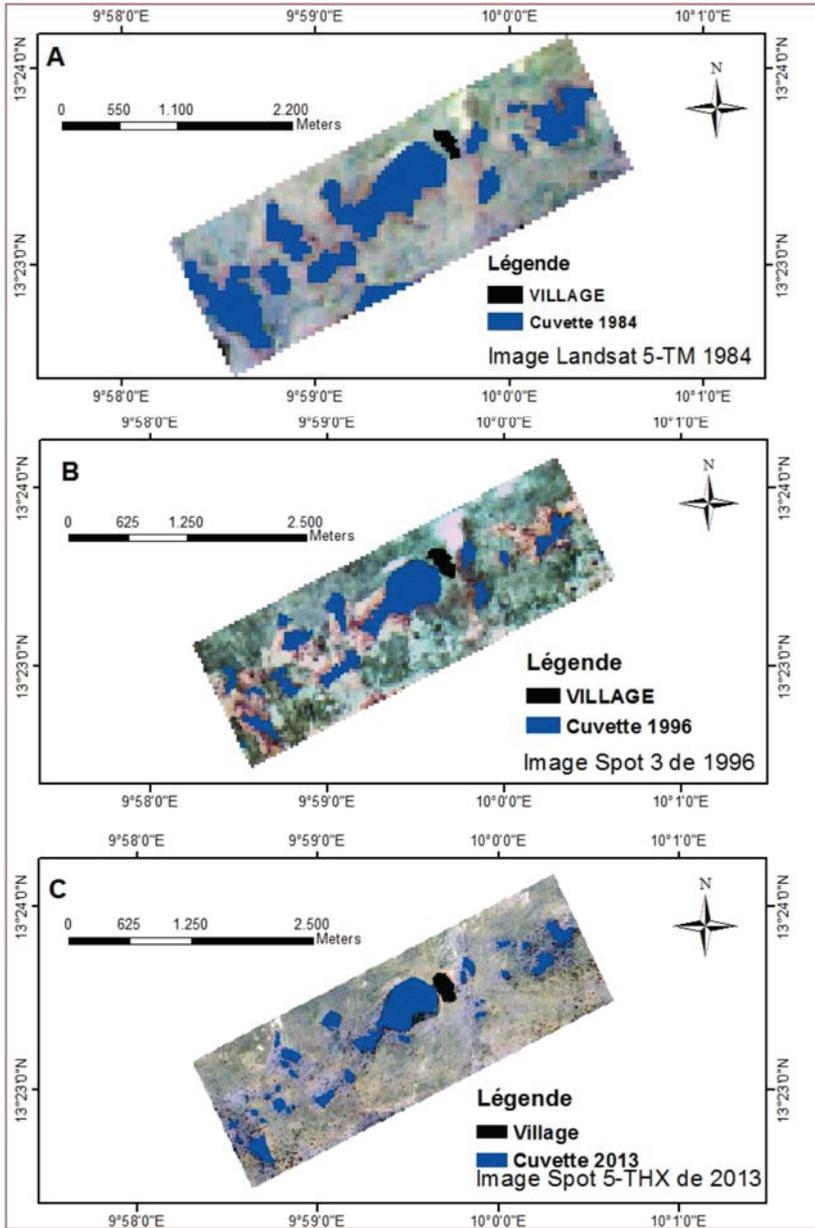


Figure 47 - Évolution des cuvettes oasiennes identifiées par classification d'image sur des images Landsat 5-TM en 1984 (A), SPOT 3 en 1996 (B) et SPOT 5-THX en 2013 (C) à l'ouest du Département de Gouré

Les faibles superficies des cuvettes oasiennes enregistrées en 2013 s'expliquent par une réduction de la taille des cuvettes identifiées en 1984 qui serait liée à leur ensablement. Par ce phénomène, les dunes vives avancent au détriment des superficies des cuvettes. En effet, dans cette zone, beaucoup de cuvettes sont menacées de disparition sous l'emprise du phénomène d'ensablement. Il se traduit généralement par la réduction de leur superficie par ensevelissement, voire leur dégradation totale.

La comparaison visuelle des cuvettes identifiées sur les figures 46 et 47 a montré qu'en 1984, les alentours des cuvettes sont peu utilisés en cultures pluviales et en 1996 la mise en valeur agricole des alentours des cuvettes commence à prendre de l'ampleur. A partir de 2013, l'ensemble des alentours des cuvettes est mis en valeur agricole. Selon le chef de village d'Iskour, le village a quitté son ancien site en raison des envahissements dunaires du village pour s'installer en son site actuel à côté de deux cuvettes (figure 47). Depuis lors, il y a une pression de plus en plus forte sur les terres autour des cuvettes. Les alentours des cuvettes tendent à se dégrader.

Les activités de défrichement de zones de parcours autour des cuvettes pour installer des cultures pluviales, le ramassage des résidus de récoltes dans les champs et les remaniements dus aux passages des troupeaux sont, pour une bonne partie, responsables de l'ensablement des cuvettes (PLECO, 2010 ; Kanembou et Karimoune, 2013). Le tapis herbacé relativement dense pendant l'hivernage est rapidement consommé ou piétiné en saison sèche mettant à nu le sol qui se trouve soumis à la déflation éolienne et à l'érosion hydrique pendant les premières pluies de l'hivernage. Ceci a favorisé la mise en place des dunes vives qui envahissent les cuvettes.

En ce qui concerne l'augmentation du nombre des cuvettes, diverses explications peuvent être avancées. La première est liée à la résolution des images utilisées dans l'étude. Par exemple, une cuvette de 0.2 ha est représentée par 2.2 pixels sur du Landsat 5-TM de 1984, 5 pixels sur du SPOT 3 et 320 pixels sur du SPOT5 de 2013. Ce qui fait que les cuvettes de taille inférieure sont difficiles à détecter même par analyse visuelles sur des images Landsat 5-TM et SPOT 3. Les petites cuvettes identifiées en 1984 peuvent aussi voir réduire leur superficie suite à leur ensablement. Ceci peut limiter leur chance d'être identifiées sur les images SPOT de 20 m de résolution. El

Kharki *et al.* (2015) montrent dans une étude d'impact de la résolution spatiale dans l'analyse d'image par objet que la précision globale des résultats de la classification d'image par objet augmente avec l'augmentation de l'échelle. Ces auteurs montrent aussi que, quand on change de résolution, la classification par objet d'image de moyenne résolution (supérieure à 20 m) présente moins d'avantage par rapport à celle à base de pixels.

La deuxième raison qui explique l'augmentation des cuvettes est le fait que les grandes cuvettes se sont fragmentées. Cette fragmentation est liée aux dépôts de sable à l'intérieur des cuvettes par l'érosion éolienne. Ces dépôts finissent par former des barrages dunaires qui partitionnent les cuvettes. Sur les figures 46 et 47, 51 cuvettes sont identifiées en 1984, 60 cuvettes en 1996 et 106 cuvettes en 2013.

La dernière raison de l'augmentation des cuvettes est la renaissance et la création de nouvelles cuvettes par déflation éolienne (Tidjani *et al.*, 2009a). Il faut noter que les édifices dunaires sont parfois vallonnés ou remaniés par l'érosion éolienne ou par des formes de déflation. Ce qui entraîne la création de couloirs de déflation et de creux de déflation. Ces couloirs et creux de déflation se développent à partir des cavités ou dépressions interdunaires qui s'approfondissent et s'élargissent suite à une augmentation locale de l'impact des vents (Tidjani *et al.*, 2009a). La déflation est très accentuée dans la partie centrale des dépressions interdunaires. C'est ainsi que, les creusements des édifices dunaires par déflation éolienne ont conduit à la création de plusieurs dépressions interdunaires dans le secteur. La déflation continue dans ces creux rapproche les nappes de la surface et provoque souvent leur inondation. En conséquence, la colonisation par une végétation composée d'*Hyphaene thebaica* associé au *Leptadenia pyrotechnica* et *Pergularia tomentosa*, est facilitée.

Notons aussi que, la caractéristique principale des cuvettes oasiennes est la végétation phréatophile du palmier doum, indicatrice de milieu où la nappe phréatique n'est pas profonde. En effet, les sécheresses des années 1975-1987 ont entraîné la baisse du niveau de la nappe dans cette zone (Bodart et Ozer, 2009). Ceci a conduit à la destruction voire la disparition de la végétation phréatophile dans certaines cuvettes oasiennes. Depuis les années 1997, plusieurs études montrent un retour à des conditions pluviométriques

meilleures (Ozer *et al.*, 2009 ; Ozer et Ozer, 2005). De ce fait, la pluviométrie de ces dernières années a contribué à l'accroissement et à la régénération naturelle des palmiers dans ces dépressions interdunaires, au vu des conditions stationnelles qui leurs sont favorables. En effet, la végétation phréatophile favorisée par la reprise d'une pluviométrie plus normale conférerait à ces dépressions interdunaires une allure de cuvette oasienne.

Par ailleurs, avec l'appui de certains projets, les populations ont mis en place des pratiques de protection de la régénération naturelle. Cette régénération naturelle est à la base de la revégétalisation de plusieurs petites dépressions. Ceci a eu des résultats assez positifs qui se traduisent par l'apparition d'une végétation pionnière de dépression interdunaire. C'est ainsi que certaines dépressions inter-dunaires ont pu évoluer en faciès proche des cuvettes oasiennes.

La réapparition de la végétation dans ces dépressions après le retour d'une pluviométrie plus normale est confirmée par plusieurs études au Sahel en général et au Niger en particulier (Savadogo *et al.*, 2015 ; Bodart et Ozer, 2009 ; Sendzimir *et al.*, 2011). Selon Bodart et Ozer (2009), à Gouré c'est dans les secteurs où aucune activité anthropique n'est venue amplifier le processus de dégradation des terres que le couvert végétal a pu réapparaître en restant toutefois moins important que ceux des années humides (ici 1957).

### **Conclusion partielle**

Cette étude était focalisée sur la dynamique des cuvettes oasiennes ainsi que des terres des milieux dunaires de leurs alentours de 1984 à 2013. Les résultats de détection des cuvettes et des classes d'occupation des sols des alentours des cuvettes par classification à base d'objets de trois images satellites de résolution spatiales différentes (1996 et 1984 : moyenne résolution ; 2013 : très haute résolution) donnent des précisions satisfaisantes. Cependant, pour des agro-écosystèmes tels que les cuvettes où les unités paysagères sont variées et parfois d'extension spatiale réduite, les images de résolutions spatiales grossières (plus de 20 m) montrent certaines limites. A ces résolutions spatiales, certains détails d'unités de paysage des cuvettes et des paysages qui leur sont associés ne peuvent pas être bien discriminés. Sur les images de 1984 et 1996, les superficies de certaines cuvettes sont surestimées

alors que les cuvettes de petite taille (inférieure à 0.3 ha) sont difficilement détectables.

Les unités d'occupation des sols des abords de cuvette connaissent une forte pression anthropique. Les superficies des édifices dunaires et vallées sèches à cultures pluviales représentent 55.9 % en 1984 des alentours des cuvettes oasiennes contre 58.3 % en 2013. Ces unités sont de plus en plus mises en valeur. Ce mode d'occupation des sols 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 réduction des superficies totales des cuvettes oasiennes de 1984 à 2013. Les cuvettes oasiennes du centre-est du Niger ont subi des modifications tant au niveau de leurs superficies qu'au niveau de leur nombre. Elles passent de 46783 ha en 1984 à 34553 ha en 2013. L'ensablement est la cause principale de la réduction des superficies des cuvettes oasiennes.

Il ressort donc de cette étude que l'ensablement gagne du terrain dans toutes les unités de l'occupation des sols. Outre les cuvettes, l'ensablement s'observe principalement dans les édifices dunaires à steppe arbustive composés de peuplements de *Leptadenia pyrotechnica* et *Calotropis procera* ainsi que dans les édifices dunaires et vallées sèches à culture pluviale.

Pour permettre aux populations de mieux valoriser, gérer et préserver les cuvettes d'un point de vue agronomique, une esquisse d'un schéma de monitoring des cuvettes est proposée dans le Chapitre VI.

## CHAPITRE VI. CONCEPTION ET REALISATION D'UN OUTIL DE MONITORING DES CONTRAINTES ET DES POTENTIALITES DES CUVETTES OASIENNES DU CENTRE-EST DU NIGER

### Introduction

Dans le Département de Gouré, l'essentiel des potentialités en ressources naturelles (eau, sol, végétation) desquelles les populations locales tirent profits est concentré dans les cuvettes oasiennes. Les contraintes majeures relatives à la dégradation de ces zones par l'ensablement, aux difficultés d'accès à l'eau (qualité et quantité) ou encore à l'enclavement rendant impossible l'écoulement des produits, constituent une préoccupation de l'état nigérien et des acteurs du développement (Tychon *et al.*, 2009 ; Tychon et Ambouta 2009). Aujourd'hui, les outils traditionnels de gestion des données sont inadaptés pour collecter, traiter et suivre de grandes masses d'information visant à décrire les phénomènes et/ou aider les décideurs et les planificateurs à prendre des décisions fiables. Sans une meilleure protection de ces cuvettes et une amélioration de leurs productions agricoles, ces zones à haute valeur agricole seront abandonnées, conduisant à l'exode rural et à la perte de terres fertiles pouvant contribuer à la sécurité alimentaire de la région (PIC, 2011). Des solutions visant la réduction de ces contraintes et l'amélioration des conditions de vie dans ces milieux doivent être recherchées.

Pour mieux gérer et suivre ces ressources naturelles, les bases de données spatiales représentent un outil permettant de faire le monitoring de l'ensemble des cuvettes oasiennes de la zone. Cet outil repose essentiellement sur la connaissance des caractéristiques des cuvettes de la zone ainsi que l'analyse et la collecte d'une masse énorme de données complémentaires (Joliveau, 2004). C'est ainsi que les bases de données à référence spatiale ou Systèmes d'Informations Géographiques (SIG) sont devenus très efficaces en tant qu'outils de stockage, de traitement et d'analyse rapide des données (Miralles *et al.*, 2004). Les SIG sont donc à la fois un outil et une méthode de conception, de collecte, d'intégration, de gestion, de manipulation et d'analyse de données physiques (sous forme de digit) et de données descriptives (sous forme de tableau) associés à un environnement informatique approprié qui gère toutes les relations.

L'objectif général de ce chapitre est de construire un système destiné à suivre les facteurs qui permettront la gestion des ressources des cuvettes avec des objectifs aussi bien de mise en valeur et d'exploitation que de conservation des écosystèmes. De façon spécifique, il s'agit d'aider à :

1. suivre les niveaux de dégradation, les potentialités et l'occupation des cuvettes ;
2. déterminer les variables explicatives (ou encore justificatives) de la mise en valeur des cuvettes.

Le système permet ainsi de projeter des perspectives d'exploitation, de protection et de conservation d'une cuvette.

C'est la première fois qu'un outil de suivi des cuvettes serait alors mis en place dans la zone. La vocation première de l'outil est de fournir de l'information à des acteurs (Etats, ONGs, projets, population ...) sur les potentialités et les contraintes des cuvettes oasiennes du Département de Gouré.

Mais pour mieux comprendre et tester l'outil de monitoring des cuvettes, trois questions de recherche relatives à la gestion (mise en valeur et protection) ont été posées :

1. dans quelles cuvettes peut-on établir des programmes nationaux de développement des cultures irriguées (choux, laitue, tomate par exemple) ?
2. quelles sont les cuvettes qui renferment de fortes potentialités, et parmi elles, quelles sont les plus menacées ?
3. est-ce que la présence/absence d'un plan d'eau ou la distance par rapport aux grands axes routiers, aux marchés et aux villages sont des variables explicatives pertinentes de la mise en cultures actuelles des cuvettes ?

## **VI.1. MÉTHODOLOGIE**

### **VI.1.2. Méthode de conception d'un système d'information de monitoring des cuvettes oasiennes**

#### ***VI.1.2.1. La réalisation d'un modèle conceptuel et physique des données***

Dans la conception, l'ensemble des données disponibles et le format dans lequel elles sont proposées, sont pris en considération afin de disposer d'une

vue d'ensemble de la base de données. Cette vue sert à les organiser selon un modèle, à réfléchir à leurs types et aux traitements dont elles peuvent faire l'objet. Le langage UML (Unified Modeling Language) a été utilisé pour créer le modèle conceptuel des données ou modèle logique des données. C'est donc un cadre de définition général du type et du contenu potentiel d'une base de données (Brodeur *et al.*, 2000 ; Laplanche, 2002 ; Pinet *et al.*, 2010 et 2003 ; Miralles *et al.*, 2004). Il définit la donnée, l'espace qu'elle va occuper dans la base et permet la compatibilité des jonctions attributaires sur les contraintes telles que les clés. Le but du modèle est de permettre la description conceptuelle des structures de données d'une application. Une bonne conception permet de limiter les erreurs futures.

Du modèle logique des données, on déduit le modèle physique des données (figure 48) après application des règles de passage du langage UML au langage SQL (Structured Query Language) selon qu'on a des relations de type 1-1 à 1-N ou de plusieurs à plusieurs (Pierra *et al.*, 2005). Une relation de type (1,1 à 1, n) se traduit par une clé étrangère (figure 48 A). La clé primaire correspondant à l'entité de cardinalité (1,1) migre comme clé étrangère dans la relation correspondant à l'entité de cardinalité (0,n). Une relation plusieurs à plusieurs (0,n à 0,n) est une association entre deux tables (1 et 2) dans laquelle un enregistrement de l'une des tables peut être lié à plusieurs enregistrements de l'autre table (figure 48 B). Pour établir une relation de ce type, une troisième table de liaison ou table de jointure contenant les champs de clé primaire des tables 1 et 2 est créée.

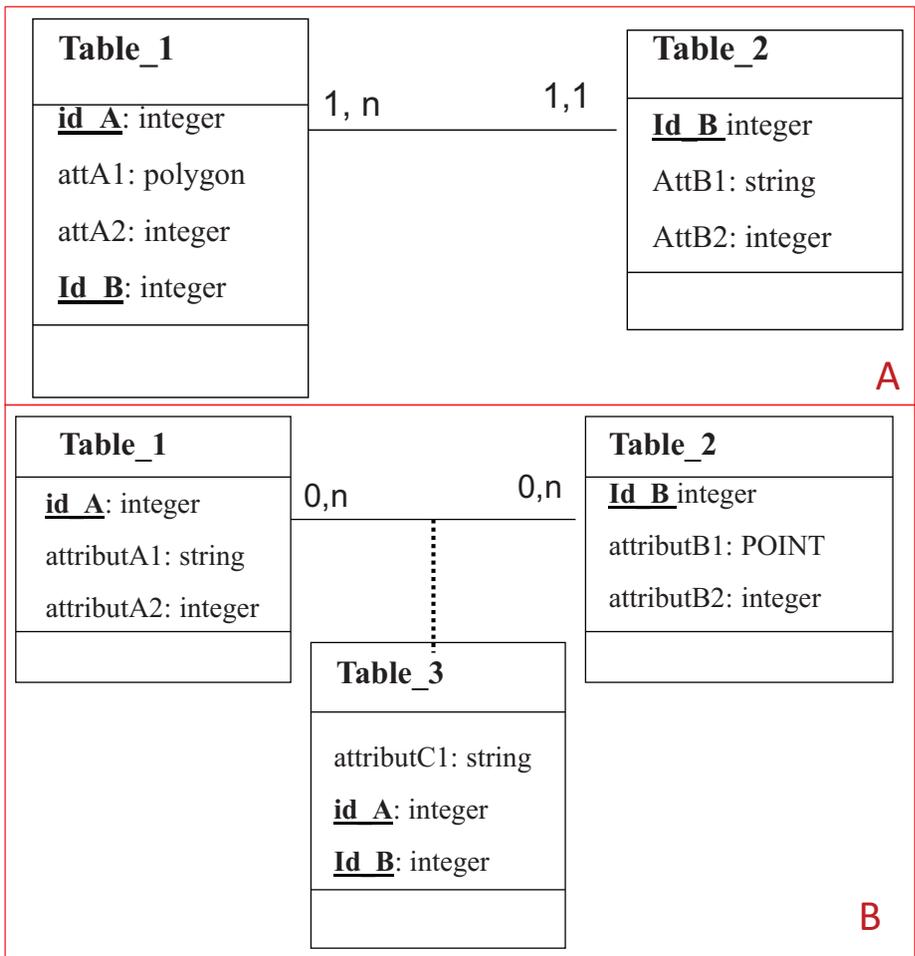


Figure 48 - Passage du modèle UML au modèle physique des données : association de type 1-1 à 1-N (A), association de type plusieurs à plusieurs (B)

### VI.1.2.2. La création de la base de données et intégration des données

Une base de données à référence spatiale a été créée. Elle permet de stocker, interroger et gérer à la fois des données spatiales et non spatiales (Miquel *et al.*, 2002). Cette base de données est une géodatabase personnelle ArcGIS qui existe sous forme de base de données Microsoft Access (Pirrot et Saint-Gérard, 2005). En outre, une seule personne à la fois peut modifier des données dans une géodatabase personnelle. Par conséquent, pour se connecter à une géodatabase personnelle, il suffit seulement de créer une connexion vers

le dossier qui contient la géodatabase. L'intégration des données dans la géodatabase personnelle est faite avec la fonction import de la géodatabase. Cette fonction permet d'alimenter la géodatabase, à partir d'une ou plusieurs sources de données. Pour faciliter les requêtes dans la base de données, les relations lorsqu'elles existent, ont été mises entre les tables.

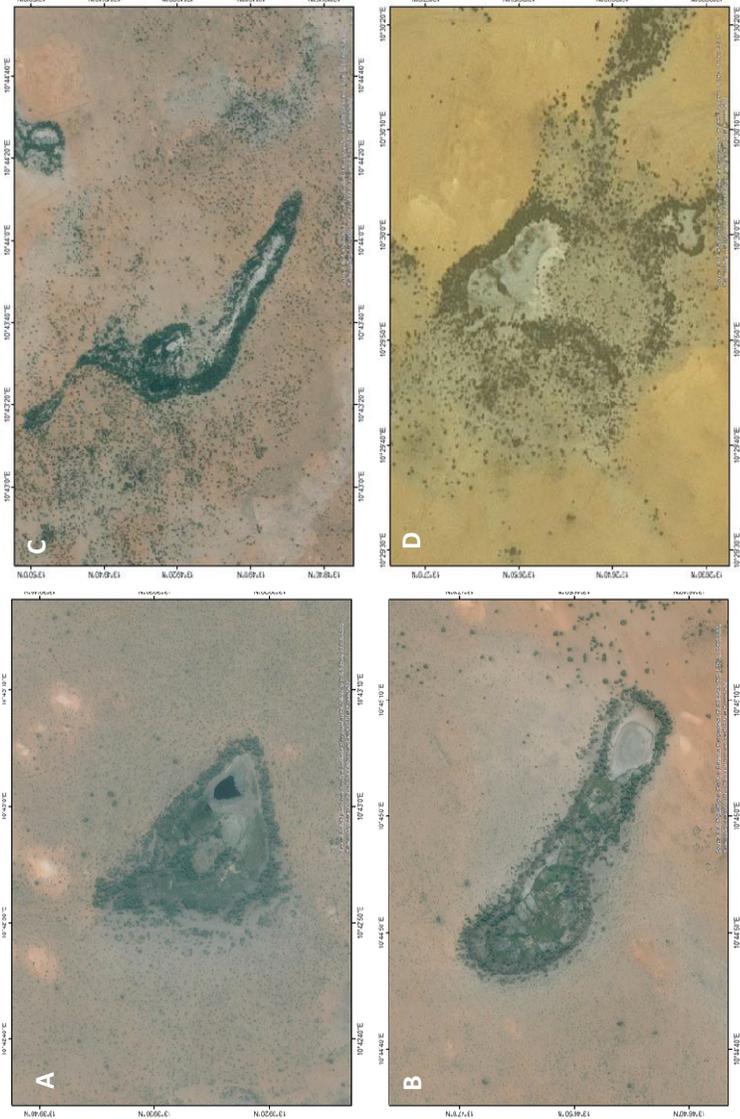
### **VI.1.3. Méthode d'estimation des paramètres d'un modèle de prédiction des cuvettes cultivées ou non cultivées**

#### ***VI.1.3.1. Le choix des cuvettes oasiennes ayant servi à la calibration du modèle***

Un sondage aléatoire simple a été effectué sur les cuvettes oasiennes de taille supérieure à 5ha afin de choisir celles qui serviront à calibrer le modèle. Le choix est porté sur les cuvettes de taille supérieure à 5 ha, car nos précédents résultats ont montré que la plupart des cuvettes cultivées correspondaient à cette taille. Le sondage aléatoire simple consiste à tirer au hasard  $n$  individus parmi  $N$ . Le sondage aléatoire permet à tous les individus de la population d'avoir une chance d'être sélectionnés pour faire partie de l'échantillon.

#### ***VI.1.3.2. La détermination des cuvettes oasiennes cultivées ou non***

Les cuvettes oasiennes mise en culture ou non ont été déterminées par analyse visuelle d'images Google Earth acquises en avril 2013. La taille de l'échantillon est de 109 cuvettes. Les surfaces cultivées à l'intérieur d'une cuvette sont identifiables par la forme régulière des zones de cultures irriguées (figure 49 A et B) et par les pistes empruntées par la population pour accéder à la cuvette. Par contre, dans les cuvettes oasiennes non cultivées, en dehors de l'organisation concentrique des auréoles, aucune autre structure d'occupation particulière du sol n'est identifiable (figure 49 C et D).



*Figure 49 - Exemples de cuvettes mises en cultures (A et B) et non mises en cultures (C et D) photo-identifiées sur image Google Earth d'Avril 2013 dans le Département de Gouré*

Dans cette étude, les deux modalités de Y sont : 1 (égale à cuvette cultivée) et 0 (égale à cuvette non cultivée). La modalité 1 est généralement utilisée pour le caractère que l'on cherche à étudier (identification des cuvettes cultivées). Dans la régression logistique, l'objectif n'est plus de modéliser Y, mais on cherche les probabilités d'avoir Y = 0 et Y = 1 conditionnellement à la connaissance des variables explicatives X = x :

$$\pi(x) = P(Y = 1 | X = x) \text{ et } 1 - \pi(x) = P(Y = 0 | X = x)$$

La régression logistique consiste donc à modéliser une certaine transformation de  $\pi$ , appelée transformation *logit*, par une fonction linéaire des variables explicatives :

$$\text{logit}(\pi(x)) = \ln \frac{\pi(x)}{1 - \pi(x)} = \beta_0 + \sum_{j=1}^r \beta_j x_j$$

Le succès de la régression logistique, est en partie dû aux capacités d'interprétabilité du modèle. Deux indices sont utilisés pour interpréter un modèle logistique (Bouyer, 1991). Il s'agit de l'odds et l'odds-ratio. L'odds représente combien de fois on a plus de chance d'avoir Y = 1 au lieu d'avoir Y = 0 lorsque X = x. On le définit comme suit :

$$\text{odds}(x) = \frac{\pi(x)}{1 - \pi(x)}$$

L'odds-ratio quant à lui représente combien de fois on a plus de chance d'avoir Y = 1 au lieu d'avoir Y = 0 lorsque X = x<sub>i</sub> au lieu de X = x<sub>j</sub>. Il se définit de même par le rapport suivant :

$$\text{odds - ratio}(x_i, x_j) = \frac{\text{odds}(x_i)}{\text{odds}(x_j)}$$

Le modèle qu'on veut mettre en place est une régression logistique par la méthode manuelle. Ce modèle est une fonction binomiale des cuvettes cultivées ou non en relation avec la distance aux grands axes routiers, la distance aux marchés, la distance et la population du village le plus proche, la présence ou l'absence d'un plan d'eau. Théoriquement, le modèle est sous cette forme :

$$\begin{aligned} \text{NESC} = & \beta_0 + \beta_1 * \text{DisGoudron} + \beta_2 * \text{DistMarché} + \beta_3 \\ & * \text{Pop\_village} + \beta_4 * \text{distVillage} + \beta_5 * \text{Mare\_O\_N} \\ & + \epsilon \end{aligned}$$

$$\beta_0, \beta_1, \beta_2, \beta_3, \beta_4 \text{ et } \beta_5 \text{ tel que } \sum \epsilon = 0$$

### **VI.1.3.3. La méthode de calibration du modèle de prédiction des cuvettes cultivées ou non**

Une régression logistique a été utilisée afin de voir les variables qui permettent de comprendre la mise en valeur des cuvettes oasiennes. Un modèle logistique permet d'exprimer une variable Y binaire en fonction de plusieurs variables Xi (Bouyer, 1991 ; Desjardins, 2005).

Cette démarche manuelle consiste à construire un modèle progressivement en identifiant les prédicteurs utiles et en supprimant ceux qui sont inutiles. Les critères de suppression se basent sur le rapport de vraisemblance pour obtenir un modèle plus fiable. Le premier critère de suppression est basé d'abord sur la probabilité de la statistique du rapport de vraisemblance, en fonction des estimations des paramètres conditionnels. La probabilité statistique (la valeur p) associée à chaque coefficient a permis de fixer un seuil à partir duquel un paramètre peut être retenu. Une variable est retenue si la valeur p associée au coefficient est significative au seuil de 5% ou si son coefficient n'est pas significativement différent de zéro. Elle est par contre supprimée uniquement si la valeur p est supérieure à la valeur seuil spécifiée (5%) ou si le coefficient est significativement différent de zéro. Ensuite, le deuxième critère se base sur l'interprétation de l'odds-ratio (OR) :

- OR=1, l'exploitation agricole d'une cuvette est indépendante de la présence ou de l'absence de la variable ;
- OR>1, l'exploitation agricole d'une cuvette est plus fréquente pour celles qui ont des valeurs élevées de la variable ;
- OR<1, l'exploitation agricole d'une cuvette est plus fréquente pour celles qui ont des valeurs faibles de la variable.

### **VI.1.4. Méthode de validation des performances du modèle logistique**

Une fois le modèle de prédiction construit, une matrice de confusion (tableau 32) obtenue en appliquant la méthode de classification sur des observations pour lesquelles la variable Y (i.e. la classe d'appartenance) est connue, a été utilisée pour en évaluer l'efficacité (Rakotomalala, 2011).

Tableau 32- Exemple de matrice de confusion

		Prédit		Total
		Y=1	Y=0	
Réal	Y=1	VP	FN	$P_r$
	Y=0	FP	VN	$N_r$
Total		$P_p$	$N_p$	$n$

- VP : vrai positif représente le nombre d'observations pour lesquelles la modalité 1 de Y a correctement été prédite ;
- VN : vrai négatif représente le nombre d'observations pour lesquelles la modalité 0 de Y a correctement été prédite ;
- FN : situation observée mais non détectée ;
- FP : situation détectée mais non observée ;
- $N_r$ ,  $P_r$ ,  $N_p$  et  $P_p$  représentent respectivement les nombres de négatifs et positifs réels et prédits.

## VI.2. RÉSULTATS ET DISCUSSIONS

### VI.2.1. Description de la base de données du monitoring des cuvettes oasiennes

Le modèle logique des entités/association créé est présenté sur la figure 50. Il est composé de onze entités : « cuvette », « village », « est\_menacée », « dune\_vive », « marché », « se\_trouve\_à », « commune », « zone\_fixation\_dune », « voies\_com », « goudron » et « piste\_rurale ».

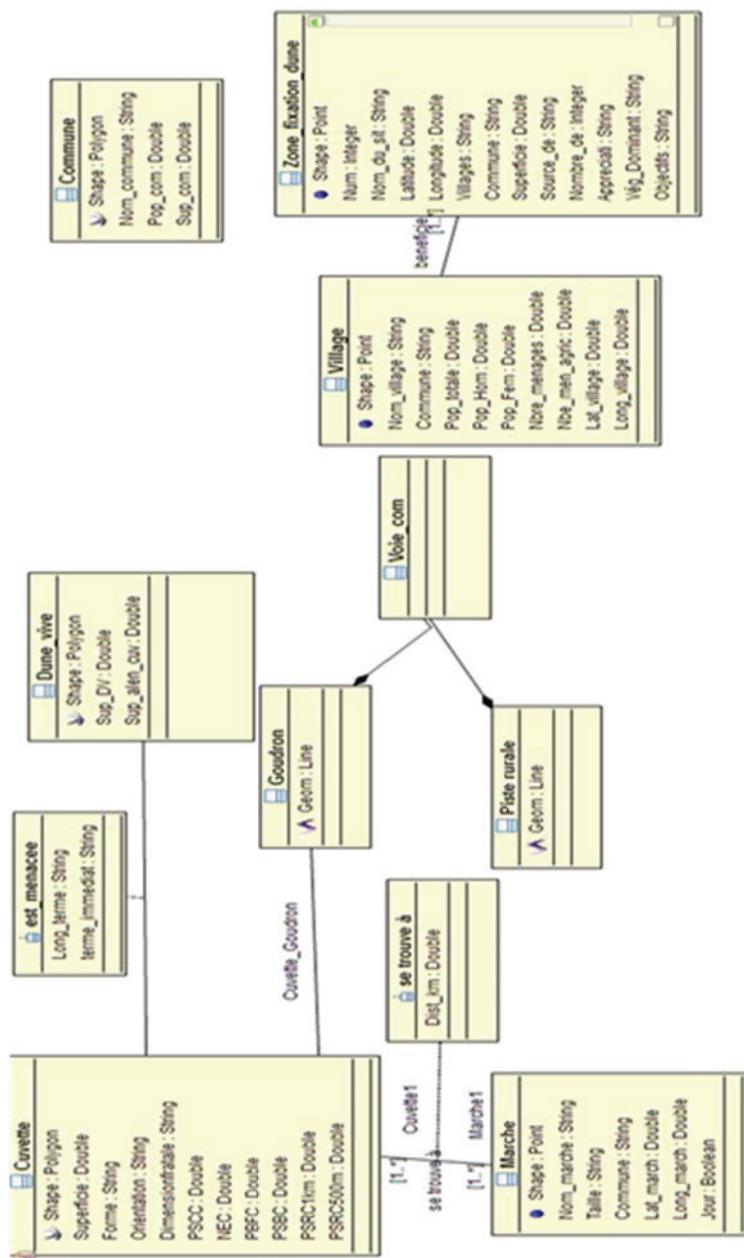


Figure 50 - Modèle conceptuel et logique de données

L'entité cuvette est représentée sous forme de polygone. Une cuvette est caractérisée par sa taille, sa superficie, sa forme, sa dimension fractale, son orientation et par 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 (PSCC) (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 (NESC) 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 (PSDSC) (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 (Cf. Chapitre IV) : les indicateurs de menace à terme immédiat (PSRDA<sub>500m</sub>) et les indicateurs à menace à long terme de cuvette (PSRDA<sub>500-1000m</sub>). Ainsi une cuvette oasienne peut être menacée à terme immédiat ou à moyen terme par une dune vive. En d'autres termes, une dune vive peut être une menace pour aucune ou plusieurs cuvettes. Une cuvette peut être menacée à moyen ou à terme immédiat par aucune ou plusieurs dunes. Les dunes vives sont des surfaces menaçantes pour les cuvettes oasiennes. Elles sont caractérisées par un code, leur taille et la superficie de l'alentour de la cuvette qu'elle menace.

Le modèle logique contient aussi des entités administratives : « **village** » et « **commune** ». Un village est identifié par ses coordonnées géographiques, un code d'identification, un nom, la population répartie par sexe, le nombre de ménages, le nombre de ménages agricoles, la commune d'appartenance et le type. Pour chaque commune du Département de Gouré, on connaît la surface géographique, le code et le nom.

Les marchés locaux ou marchés hebdomadaires, sont représentés par leurs coordonnées X et Y. Ils sont variables selon la taille. La distance de chaque

cuvette par rapport aux marchés est connue. Les marchés se regroupent en quatre principales catégories (Dardel et Populin, 2013) :

- les petits marchés ont une superficie qui varie entre 0.1 à 0.5 ha ;
- les marchés moyens ont une superficie comprise entre 0.5 à 2 ha ;
- les grands marchés possèdent une superficie qui dépasse 2 ha ;
- les très grands marchés possèdent les mêmes dimensions que les grands. La différence s'observe sur le terrain avec la présence des détaillants et des grossistes des produits de cuvette au niveau des très grands marchés.

Les voies de communication (voies\_com) sont représentées par la route goudronnée (route nationale N°1) et les pistes sableuses qui relient les villages. La classe voies\_com est un cas particulier d'association non symétrique exprimant une relation de contenance, c'est à dire qu'elle est composée par deux sous-classes : goudron et piste rurale.

Les sites de fixation des dunes (zone\_fixation\_dune) sont des lieux d'intervention gérés par l'Etat et ses partenaires pour lutter contre le phénomène d'ensablement des cuvettes et/ou des infrastructures socio-économiques dans le Département de Gouré. La fixation des dunes comporte deux principales phases qui sont complémentaires, à savoir la fixation mécanique et la fixation biologique. La fixation mécanique consiste en la réalisation de clayonnage à base de matériaux localement disponibles (rachis de palmier doum ou branchage de *Leptadenia pyrothecnica*) et tenant compte du modelé dunaire. La fixation biologique consiste en la plantation d'espèces ligneuses forestières adaptées au contexte. A cet effet, les espèces les plus utilisées sont : *Prosopis juliflora*, *Prosopis chilensis*, *Bauhinia rufescens*, *Acacia raddiana*, *Acacia nilotica*, etc. Pour chaque site de fixation de dune, on retient ses coordonnées GPS, son identifiant, son nom, le village et la commune auquel il est rattaché, la superficie de la dernière fixation, le nombre de fois qu'il a été fixé, les objectifs de la fixation, la végétation dominante et l'historique de la fixation. Des photos permettant d'apprécier la couverture végétale sont aussi disponibles.

Ainsi, les classes « est\_menacée » et « se\_trouve\_à » sont des classes-associations. C'est un cas particulier d'association. La classe « est\_menacée » relie les classes « Cuvette » et « Dune\_vive » par une relation de type [0, n] à

[0, n] et contiennent des attributs. La classe « se\_trouve\_à » lie quant à elle la classe cuvette à la classe Marché par le même type de relation.

Enfin, notons que toutes classes sont des classes spatiales sauf les classes d'associations « est\_menacée » et « se\_trouve\_à ». Une classe spatiale contient des objets géographiques. Les classes « cuvette », « dune\_vive » et « commune » sont de type zonal alors que les classes « marché », « village », « zone\_fixation\_dune » sont de type ponctuel. La classe « voie\_com » est une entité linéaire. Notons qu'il est inutile d'établir une relation d'agrégation entre ces deux classes spatiales car leur caractère spatial suffit à déterminer leur relation d'appartenance.

Le modèle logique converti en modèle physique est illustré en figure 51. Le modèle physique présente la façon dont les tables sont organisées dans un système de gestion de base de données. Dans ce modèle on observe les clés primaires et secondaires qui permettent d'identifier de façon unique les tables. Le modèle physique de données permet d'analyser les tables de la base de données. Il est plus concret qu'un modèle logique de données.

## **VI.2.2. Exploitation de la géodatabase**

### ***VI.2.2.1. Requête 1: Dans quelles cuvettes peut-on établir des programmes de développement de cultures irriguées (choux, laitue, tomate par exemple) ?***

Pour répondre à cette requête, les variables *taille des cuvettes* (supérieure à 20 ha), *niveau d'exploitation agricole des cuvettes*, *distance par rapport au goudron* et *couche des communes* ont été croisées afin de les afficher comme sur la figure 52. Chaque cuvette est représentée par une flèche proportionnelle à sa distance par rapport au goudron, suivie de la valeur de son niveau d'exploitation.

Une première analyse montre que les cuvettes de la commune de Kellé et celles situées au nord-ouest des communes de Gouré et Guidiguir ne répondent pas à la requête à cause du niveau d'exploitation agricole très faible des cuvettes. On observe une forte concentration de cuvettes répondant à ces critères au sud-est et sud-ouest du Département de Gouré. On peut ajouter la fonction *capacité d'écoulement* en jouant sur la distance au goudron. La commune de Bouné renferme le plus de cuvettes de taille supérieure à 20 ha.

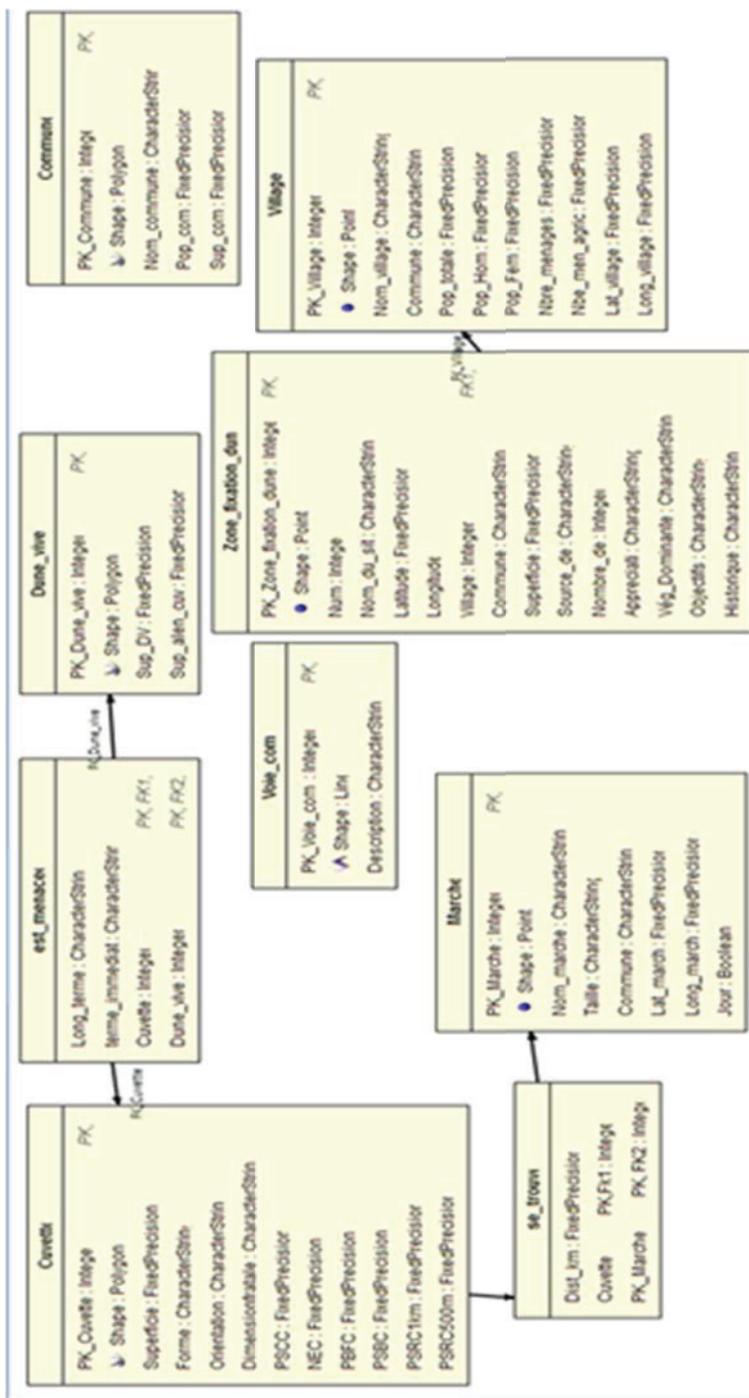


Figure 51 - Modèle physique de données

Par ailleurs, on observe que le sud-est et sud-ouest du Département de Gouré comporte de nombreuses grandes cuvettes oasiennes. Ces dernières sont malheureusement éloignées de la seule route goudronnée de la zone. On peut donc proposer en se basant sur la figure 52, les zones où il faut construire une route pour désenclaver les cuvettes à très fortes potentialités agricoles. Ceci démontre que la géodatabase peut bien constituer un outil d'aide à la réflexion et à la décision.

#### ***VI.2.2.2. Requête 2 : Affichez les cuvettes oasiennes qui subissent une menace immédiate très forte***

Les cuvettes à menace immédiate très forte se localisent à l'est de la zone d'étude dans les communes de Bouné et de Gouré (figure 53). La localisation des cuvettes menacées à l'est du Département de Gouré montre que la dégradation des cuvettes et des terres est plus avancée dans cette partie du Département.

Les travaux de Bodart et Ozer (2009) ont montré que les superficies des dunes vives sont en progression. Cette progression se fait aux dépens des superficies des cuvettes. Les cuvettes, mais aussi les villages et les routes, sont fréquemment menacés d'ensablement suite à la réactivation de dunes anciennement fixées. Cette réactivation a été favorisée par les sécheresses des années 70 à 90 et par la pression démographique qui a engendré l'extension des terres cultivées et l'accroissement du cheptel (Kanembou, 2007). Pour lutter contre l'ensablement, on combine la fixation physique par des palissades à la fixation biologique par des espèces arbustives. Ces cuvettes très menacées doivent faire l'objet d'une fixation mécanique et biologique des dunes.

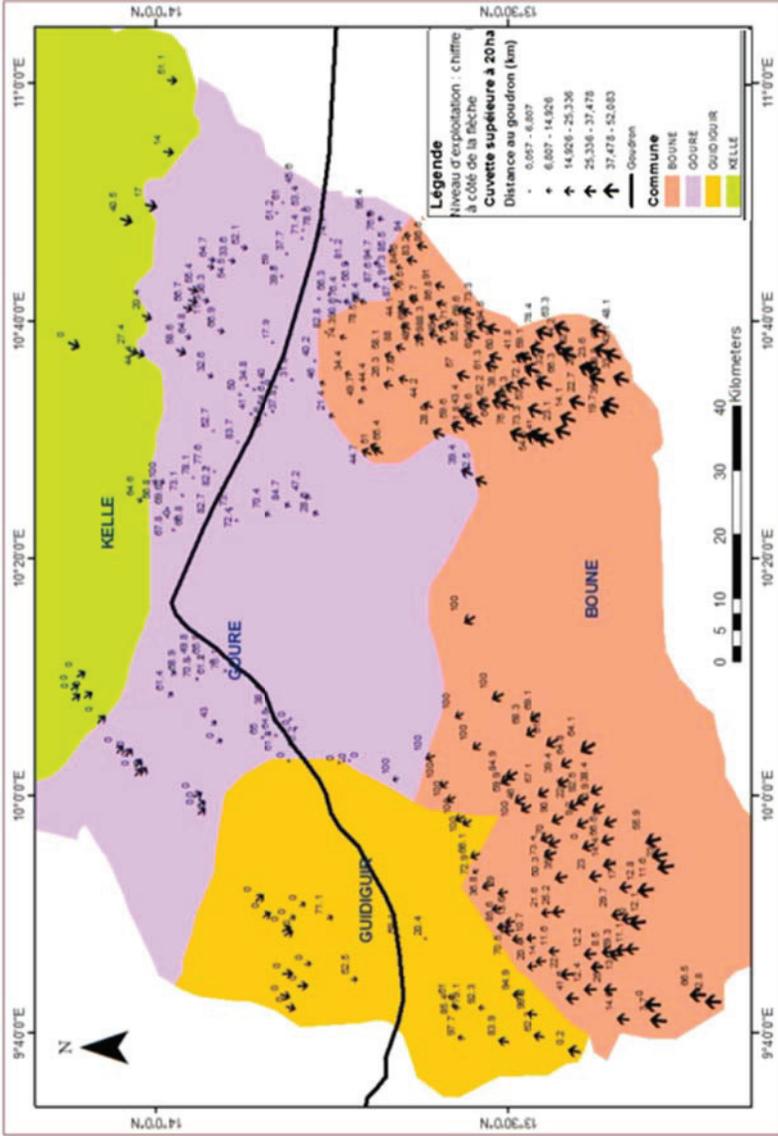


Figure 52 - Répartition spatiale des cuvettes de tailles supérieures à 20ha en fonction de leur niveau d'exploitation agricole et la distance par rapport au goudron

Le coût de réalisation du traitement des dunes vives à l'hectare s'élève à 232 000 FCFA (Abdou et Adj, 2009) répartis en coût des palissades (210 000 FCFA/ha) et coût des plantations (22 000 FCFA/ha). Les dunes vives qui menacent ces cuvettes occupent une superficie totale de 11266 ha. Pour stabiliser ces dunes vives, il faudrait un investissement de 2 613 712 000 FCFA.

Ce coût financier ne tient pas compte des frais d'entretien du site (gardiennage), d'amortissement du petit matériel utilisé (jalons, rubans, pelles, houe à manche court, cordes) et de supervision par les cadres techniques (Abdou et Adj, 2009).

Les travaux de Abdou et Adj (2009) et Abdou et Djambouto (2009) montrent que les avantages liés à l'exploitation agricole des cuvettes permettent de couvrir les coûts de traitement des dunes. En effet, l'opération de traitement des dunes malgré son coût élevé est économiquement rentable.

***VI.2.2.3. Requêtes 3 : Parmi les variables suivantes : la distance par rapport à la seule route goudronnée, distance par rapport aux marchés, distance par rapport aux villages, population du village le plus proche, présence ou absence d'un plan d'eau à l'intérieur de la cuvette, quelles sont les variables explicatives pertinentes de la mise en culture ou non des cuvettes ?***

Le modèle de régression logistique mis en place est une fonction binomiale de la mise en cultures ou non des cuvettes en relation avec la distance au goudron, la distance aux marchés, la distance au village, la population du village le plus proche, la présence ou l'absence d'un plan d'eau.

La régression logistique manuelle a permis dans la phase exploratoire d'élaborer un premier modèle et d'identifier un premier sous-ensemble utile de prédicteurs. Ainsi, à la première étape, les variables population du village le plus proche, distance par rapport au goudron et distance par rapport au village le plus proche ont été supprimées en raison des valeurs de p-value qui ne sont pas significatives au seuil de 5%.

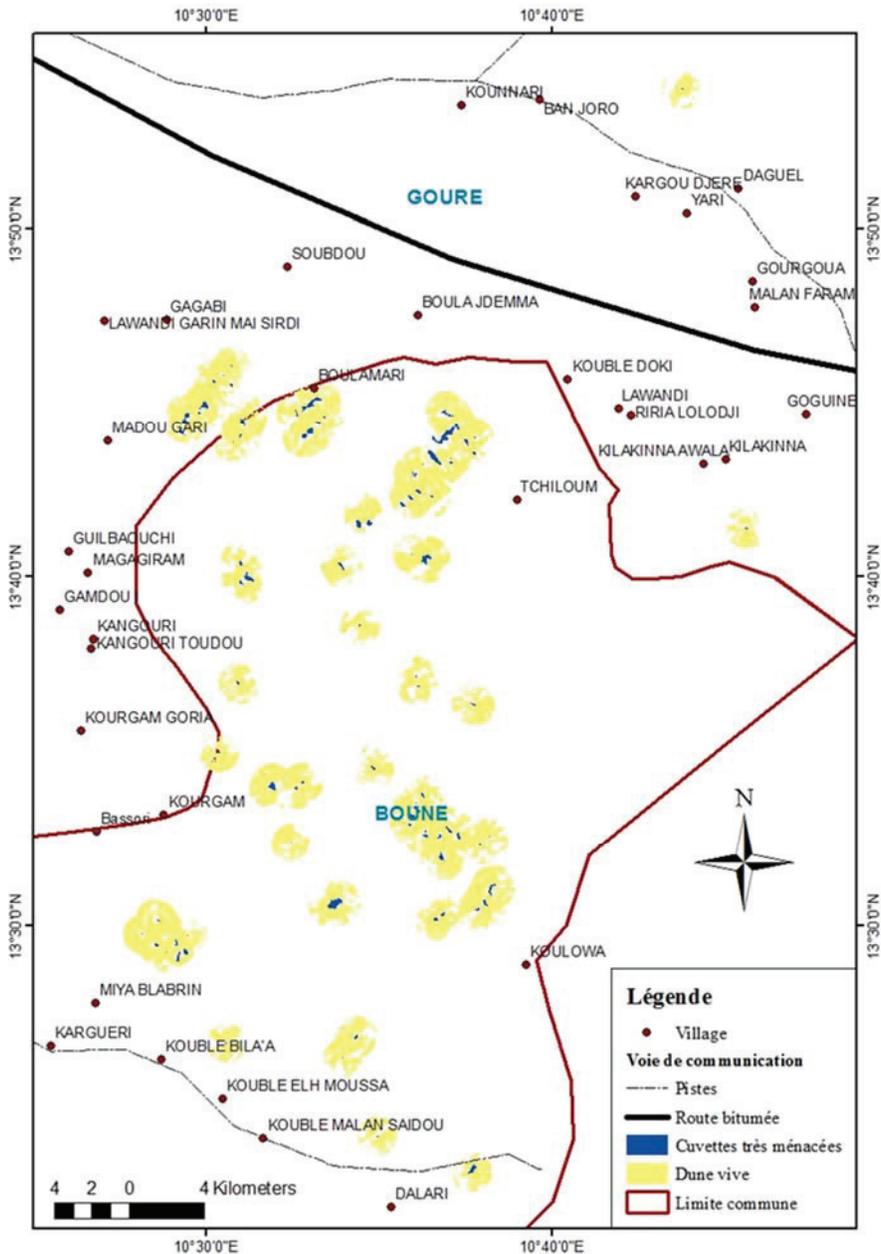


Figure 53 - Localisation des cuvettes oasiennes à menace immédiate très forte dans le Département de Gouré

Ensuite, une deuxième régression logistique avec deux variables (présence ou absence de plan d'eau et la distance par rapport aux marchés) a été élaborée.

La valeur de l'odds-ratio de la variable *distance\_marché* est sensiblement égale à 1 (tableau 33). Ce qui correspond à une absence d'effet de la distance par rapport au marché malgré la significativité du p-value. Cela signifie que les chances pour une cuvette d'être mise en cultures lorsque qu'elle est proche ou loin d'un marché sont les mêmes.

*Tableau 33 - Coefficients logit et rapports de cotes issus de la régression logistique multiple sur les cuvettes mises en cultures ou non en fonction des variables relatives à la distance aux marchés et la présence ou l'absence d'un plan d'eau*

	<b>Coefficients</b>	<b>Erreur- type</b>	<b>Statistique t</b>	<b>Probabilité</b>	<b>odds ratios</b>
<b>Constante</b>	-2.99	0.749	-3.822	0.00013	0.36
Présence/absence de mare	1.19	0.48	2.481	0.01309	3.29
Distance marché	0.08	0.028	3.068	0.002167	1.09

Par contre, la mise en culture d'une cuvette est bien influencée par la présence d'un plan d'eau à l'intérieur de la cuvette comme en témoigne l'odds ratio égal à 3 (tableau 34). Cette valeur de l'odds ratio veut dire qu'on a trois fois plus de chance de voir une cuvette cultivée avec un plan d'eau temporaire ou permanent que de trouver une cuvette cultivée sans plan d'eau. Ceci est bien normal, car en raison de la quasi absence de systèmes de pompage des eaux souterraines pour l'agriculture, les cuvettes à plan d'eau temporaire ou permanente donnent plus de possibilités d'irrigation que celles qui n'en disposent pas. Une cuvette sans plan d'eau de surface nécessite un investissement supplémentaire relativement élevé pour faire un puits et l'équiper en motopompe.

Tableau 34 - Coefficients logit et rapports de cotes issus de la régression logistique simple sur les cuvettes cultivées ou non en fonction de la variable présence ou l'absence d'un plan d'eau

	<b>Coefficients</b>	<b>Erreur- type</b>	<b>Statistique t</b>	<b>Probabilité</b>	<b>odds ratios</b>
<b>Constante</b>	-1.02	0.3887	-2.628	0.00858	0.36
<b>Présence/ absence de mare</b>	1.1	0.4522	2.436	0.01485	3.01

En prenant en compte les variables les plus significatives et en supprimant celles qui ne le sont pas, seule la variable présence ou l'absence d'un plan d'eau permet d'expliquer pourquoi les cuvettes sont cultivées ou pas. Le modèle de régression logistique simple élaboré s'exprime comme suit :

$$\text{NESC} = 1.1 * \text{Mare\_O\_N} - 1.02$$

L'évaluation de ce modèle à travers la matrice de confusion contenant les effectifs de vrais négatifs (VN), de vrais positifs (VP), de faux négatifs (FN) et de faux positifs (FP) donne un indice critique de succès de 60% (tableau 35). Cet indice renseigne sur le taux de succès correspondant à la probabilité de bon classement du modèle.

Tableau 35 - Matrice de confusion contenant les effectifs de vrais négatifs (VN), vrais positifs (VP), faux négatifs (FN) et faux positifs (FP)

		<b>Prédit</b>		<b>Total observé</b>
		<b>Oui</b>	<b>Non</b>	
<b>Réel</b>	<b>Oui</b>	55	20	68
	<b>Non</b>	36	17	60
	<b>Total prédit</b>	<b>91</b>	<b>37</b>	<b>128</b>

La capacité du modèle ou probabilité de détecter des vrais positifs est de 60.4%. Cette probabilité traduit les chances d'une cuvette d'être cultivée lorsque celle-ci possède un plan d'eau. Les vrais positifs ont des sols très aptes

aux cultures irriguées. En plus, la proximité de la nappe permet aux agriculteurs de la zone d'y développer une agriculture diversifiée palliant les déficits des cultures pluviales (Jahiel, 1998).

À l'inverse des vrais positifs, on observe les faux négatifs qui représentent 39.6% des cuvettes prédites par le modèle. Les faux négatifs sont des cuvettes à nappe d'eau superficielle qui ne sont pas cultivées. Plusieurs raisons peuvent expliquer le taux des faux négatifs dans le Département de Gouré, notamment :

1. la forte fréquence de divagation des animaux dans les parcelles des cuvettes oasiennes. Notons que la zone d'étude est à vocation surtout pastorale. Ainsi, les cuvettes oasiennes sont forées de nombreux puits traditionnels et modernes qui servent à la fois l'approvisionnement en eau des populations riveraines et à l'abreuvement des animaux des villages environnants et ceux des éleveurs transhumants. Dans cette zone, la première condition pour installer les cultures irriguées est de clôturer les parcelles. Les clôtures sont le plus souvent réalisées avec les palissades ou les branchages d'épineux. Sans ces clôtures les animaux qui viennent s'abreuver aux puits ou pâturer dans la cuvette pourraient divaguer dans les parcelles cultivées. Dans certaines cuvettes oasiennes éloignées des villages, la population a recours à un gardien pour limiter ces dégâts. C'est le cas de la cuvette oasienne de N'Guelguidadé qui se trouve à 5 Km du village de Tchilim auquel il est rattaché.

La divagation des animaux constitue un grand handicap pour la mise en valeur de nombreuses cuvettes. Ce sont surtout les cuvettes oasiennes éloignées des villages qui sont touchées par la divagation des animaux des éleveurs transhumants. Ensuite viennent les cuvettes oasiennes situées près des villages où certaines, malgré leurs potentialités en surface cultivables, sont utilisées pour l'abreuvement des animaux du village. Ainsi à l'intérieur de ces faux négatifs, la divagation des animaux favorise l'envahissement des cuvettes par *Proposis spp* ou bien par une savane arborée très dense composée essentiellement d'*Acacia raddiana* et de *Hyphaene thebaïca*. C'est ce qui donne à ces faux négatifs des potentialités à produire non seulement du bois de chauffe ou des poutres mais aussi des produits forestiers non ligneux

dérivés du palmier doum. C'est pourquoi la plupart de ces faux négatifs disposent de peu de surfaces cultivables.

2. La dernière raison qui explique le nombre élevé de faux négatifs dans cette zone est le phénomène de l'exode rural. Ce phénomène concerne chaque année un nombre élevé d'émigrants qui délaissent les campagnes et se dirigent généralement vers la Libye, le Cameroun, le Nigeria ou la Côte d'Ivoire en quête d'emplois temporaires en milieux urbains. Ainsi, cette situation d'abandon des zones rurales affecte considérablement la mise en valeur des cuvettes oasiennes puisque ceux qui peuvent travailler la terre l'abandonnent, laissant sur place une population constituée de vieillards, d'enfants et de femmes, incapables de travailler.

En ce qui concerne le taux des faux positifs, il est 26.7 %. Les faux positifs représentent les cuvettes mises en cultures sans nappe d'eau superficielle. Sur le terrain, ces cuvettes sont à nappe phréatique profonde mais ont bénéficié d'appuis de projets et ONG en puits, en forages et en moyen d'exhaure. Sans ces puits et forages, l'irrigation y serait impossible. Ces cuvettes sont situées généralement dans la partie nord de la zone d'étude. Parmi les faux positifs de la zone, on peut citer les cuvettes de Tchago, Worro, Balla, Goguinée qui font partie des cuvettes suivies par le Programme interuniversitaire de recherche sur l'ensablement des cuvettes de Gouré.

Enfin, la probabilité de détection des vrais négatifs (VN) est 45.9%. Les vrais négatifs sont des cuvettes oasiennes qui ne sont pas mises en cultures et ne disposent pas de plan d'eau de surface. Le niveau de la nappe phréatique des vrais négatifs est très profond (supérieur à 4m). Dans ces vrais négatifs, il faut des moyens d'exhaure pour irriguer les parcelles. Cependant, vu le bas niveau des revenus de la population, peu de personnes arrivent à se procurer des moyens pour acquérir des motopompes pour irriguer les parcelles. C'est pourquoi les vrais négatifs à eau très profonde ne font l'objet d'aucune exploitation agricole continue et sont le plus souvent fréquentées par les éleveurs qui y font pâturer leurs troupeaux. Ce sont des lieux privilégiés pour les prélèvements du bois de chauffe et de palmes et folioles de palmier doum (Jahiel, 1998).

Selon Jahiel (1993), ces cuvettes ont été progressivement abandonnées, parce qu'elles sont devenues inadaptées aux techniques agricoles traditionnelles, qui nécessitent le recours à l'irrigation permanente pour la mise en valeur.

### **Conclusion partielle**

L'outil de monitoring proposé ici a consisté à la création d'une géodatabase permettant d'une part de visualiser des informations géographiques et d'autre part de faire des analyses et traitements sur la base. L'objectif principal de cet outil était de mettre en place un processus informationnel et une méthode d'acquisition, de traitement et d'analyse orientée de l'information relative aux cuvettes oasiennes.

Pour tester l'outil, des informations de la géodatabase ont été croisées afin de voir si l'outil permet de répondre à des requêtes de gestion des cuvettes oasiennes. Les réponses à ces requêtes ont montré que l'outil de monitoring permet de faciliter en éclairant la prise de décision stratégique et opérationnelle aux différents niveaux hiérarchiques de l'administration. À travers cet outil, des informations peuvent être fournies aux gestionnaires afin de les aider dans leurs prises de décision.

L'analyse des données de la géodatabase a permis de créer un modèle de régression logistique simple des cuvettes mises en culture ou non en fonction de la présence ou l'absence d'un plan d'eau à l'intérieur de la cuvette avec un indice de succès critique de 60%. Cependant, il est possible d'améliorer ce modèle en ajoutant d'autres variables explicatives non encore disponibles. Ces variables ou informations peuvent être relatives au niveau de revenus des exploitants, à la population totale qui exploite une cuvette, etc. Elles pourraient contribuer à explorer plus précisément les conditionnalités économiques de mise en valeur des cuvettes.

## CONCLUSION GENERALE

Ce travail avait pour objectif de mettre en place un outil de caractérisation et de monitoring de l'ensemble des cuvettes de la zone d'activité à l'aide d'outils de télédétection et des systèmes d'information géographique.

Dans la présente étude, nous sommes partis de l'hypothèse selon laquelle pour préserver les cuvettes oasiennes, il faudrait d'abord les localiser et les connaître. La localisation des cuvettes oasiennes a été rendue possible grâce à la télédétection.

Trois méthodes de détection des cuvettes oasiennes (analyse pixellaire, analyse texturale et analyse par objet) ont été développées. La première méthode (analyse pixellaire) identifie les cuvettes avec une probabilité de détection de 98%. Néanmoins, elle identifie d'autres objets comme étant des cuvettes alors qu'elles ne le sont pas dans la réalité. C'est ce qui explique le taux de fausses alarmes de 30.8%. L'indice critique de succès obtenu par analyse pixellaire (0.69) est inférieur à celui obtenu par analyse texturale (0.78). Il est ainsi démontré des performances de l'analyse par texture supérieures à l'analyse par pixel.

Cette deuxième méthode de détection des cuvettes oasiennes (analyse par texture) utilise, comme descripteur, la variance. Son efficacité est liée aux descripteurs choisis (attributs texturaux retenus, nombre d'attributs et fenêtre d'analyse). La démarche d'analyse texturale développée a permis d'aborder aussi un aspect important de la classification d'image par détection des contours des objets qui la compose. L'extraction des contours des cuvettes oasiennes, en utilisant une approche de seuillage de la variance conduit à un partitionnement de l'image en deux parties : une partie qui constitue les cuvettes de la zone et l'autre partie comprenant les autres objets qui composent l'image. Une autre classification portant uniquement sur cette deuxième partie a permis de détecter et différencier les vallées sèches, les édifices dunaires et les collines.

En ce qui concerne les applications utilisant les cartes d'occupation des sols, la méthode d'analyse basée sur la variance n'est pas une référence car elle ne permet pas de faire la discrimination entre objets. En effet elle permet de détecter seulement les objets ayant une texture macroscopique. Mais, la

méthode par la matrice de co-occurrence, donne de bons résultats sur des images qui contiennent un grand nombre de classes d'occupation de sol (Franklin *et al.*, 2000; Wellens, 2014).

La troisième méthode testée est une analyse par objets d'image. Cette méthode a l'avantage de grouper les pixels semblables et contigus en objets. Les résultats de l'analyse par objet sont encore plus prometteurs avec un indice critique de succès de 0.94.

L'évaluation comparative de ces méthodes de détection des cuvettes oasiennes a montré que la classification objet-orientée est plus performante que celles basées sur l'analyse par pixels et sur l'analyse des textures. Il faut noter que cette première partie de la thèse a permis ainsi d'obtenir une information originale dans cette zone. Cette information établit l'inventaire exhaustif des cuvettes oasiennes dans cette zone, leur localisation et leurs superficies. C'est la première fois qu'une telle étude d'inventaire des cuvettes oasiennes est réalisée au Niger en particulier et au monde en général.

Le troisième chapitre part de cet inventaire pour décrire la morphologie et l'orientation des cuvettes oasiennes. L'étude sur la morphologie et l'orientation des cuvettes oasiennes a servi à mieux comprendre la genèse des cuvettes oasiennes ainsi que les processus d'ensablement. Elle a aussi confirmé la relation entre la morphologie des cuvettes et leur genèse ainsi que leur dynamique. Les cuvettes circulaires et ovoïdes sont surtout celles de petites tailles alors que la plupart des cuvettes très étirées sont généralement de grandes tailles. Les formes ovoïdes correspondent à une dégradation très poussée du réseau hydrographique. Les cuvettes très étirées sont situées dans l'axe de segments de réseaux hydrographiques ayant des seuils de dégradation moins poussés. Elles sont associées à des dunes longitudinales qui ont interféré avec les anciens cours d'eau. Les cuvettes de forme amiboïde seraient liées à une association de dunes longitudinales, dunes transversales et affleurements rocheux.

L'analyse des cuvettes à l'aide de la dimension fractale a permis de mettre en évidence leur degré d'irrégularité ou de fragmentation, donc la rugosité de leur contour. Ainsi trois catégories de formes de cuvettes ont été identifiées sur la base des valeurs de la dimension fractale : très lissées (19333 ha), lissées (12415 ha) et moyennement lissées (1705 ha). Les formes régulières des

cuvettes très lissées et lissées s'expliquent par une évolution des versants dunaires suite aux apports et prélèvements de sable par le vent suivant les directions privilégiées du vent. Les contours réguliers de ces cuvettes sont liés aux apports éoliens qui ont retracé les limites des objets naturels. Les faibles valeurs de l'indice fractal permettent de confirmer que les cuvettes oasiennes résultent d'une désorganisation du réseau hydrographique par l'action du vent (dépôts et érosion).

Par ailleurs, dans cette étude, les pressions d'origine agricole ou éolienne à la base de la dégradation des ressources naturelles de ces cuvettes oasiennes (eau, sol, végétation, natron) ont été pour la première fois spatialisées et hiérarchisées dans cette zone. Une telle étude permet donc de déterminer les potentialités et contraintes des cuvettes oasiennes. Certaines cuvettes ont surtout des aptitudes très élevées à produire du bois (bois de chauffe, des poutres pour la construction des maisons, hangars) et aussi des produits forestiers non ligneux. 87 % des cuvettes ont des surfaces boisées élevées à très élevées. Les cuvettes à surfaces boisées très élevées représentent 89% de la superficie totale des cuvettes. Mais, les cuvettes oasiennes ne sont pas toutes utilisées à 100% de leurs potentialités. Le niveau d'exploitation agricole est nul pour 58% des cuvettes et faible pour 6% autres. Plusieurs raisons expliquent le faible niveau d'exploitation agricole des cuvettes oasiennes notamment la profondeur du niveau de la nappe phréatique, la divagation des animaux, l'exode rural, le manque des moyens d'exhaure etc....

Il faut noter aussi que ces cuvettes sont menacées d'ensablement. Dans cette étude, une typologie des cuvettes oasiennes a été faite sur le long terme et à terme immédiat. Sont considérées cuvettes menacées à terme immédiat celles encadrées de dunes ravivées dans une zone tampon de 500 m autour de la cuvette. Celles menacées dans le long terme disposent de dunes vives dans une zone tampon de transition entre 500-1000 m autour de la cuvette.

Les contraintes et potentialités naturelles des cuvettes déterminées par classification d'image sont variables. Elles permettent néanmoins de gérer, de conserver et de suivre ces cuvettes oasiennes à travers des indicateurs spatiaux de dégradation et de potentiel.

Les indicateurs spatiaux élaborés dans ce travail ont servi de base pour la mise en place de l'outil de monitoring des cuvettes afin de mieux les protéger

ou pour déterminer la nécessité de les protéger. La géodatabase qui contient toutes les informations de l'outil de monitoring est représentée par des couches spatiales et non spatiales. Les couches spatiales sont représentées par les cuvettes oasiennes ainsi que les dunes vives se trouvant dans une zone tampon d'un kilomètre autour. Les autres couches concernent les marchés hebdomadaires, les villages, les sites de fixation des dunes, les communes. Ces éléments ont été inventoriés et caractérisés.

Aux tests de requêtes, l'outil a su répondre dans sa phase test à des questions de gestion et conservation. C'est ainsi qu'une hiérarchisation des cuvettes selon les contraintes et potentialités a été effectuée afin de connaître celles qui nécessitent une protection rapide contre l'ensablement et celles à l'intérieur desquelles on peut mettre en place des programmes de développement locaux. Cela a permis de mettre en évidence les zones désenclavées dans la région. Un modèle d'exploitation des cuvettes oasiennes a identifié les variables explicatives déterminantes actuelles pour la mise en valeur des cuvettes. En effet, la mise en valeur agricole d'une cuvette est surtout liée, selon le modèle, à la présence d'un plan d'eau à l'intérieur de la cuvette. Une cuvette oasienne possédant un plan d'eau nécessite peu de moyens et d'efforts pour faire les cultures irriguées.

Cette étude relative à la mise en œuvre d'un outil pour le monitoring des cuvettes oasiennes permet à travers des requêtes d'établir aussi un planning prévisionnel de la réalisation d'actions de fixation mécanique et biologique de dune. L'outil de monitoring décrit dans cette étude permet de modéliser un grand nombre de problèmes de gestion, de préservation et de suivi des cuvettes oasiennes. Il permet non seulement de suivre les cuvettes menacées dans le long terme mais aussi à terme immédiat. Face à un problème de choix, un acteur (décideurs, ONG, projets...) doit pouvoir s'appuyer sur cet outil pour prendre des décisions.

Cette étude a démontré encore une fois les capacités de la télédétection et des SIG à décrire, analyser les données obtenues et élaborer des indicateurs de potentialités et de contraintes dans une zone aussi vaste que le Département de Gouré. Néanmoins, l'outil de monitoring des cuvettes oasiennes élaboré peut être amélioré. C'est pourquoi des pistes de recherches visant leur amélioration sont ci-dessous proposées. Il s'agira en ce sens de :

- élaborer des indices de vulnérabilité des cuvettes en tenant en compte de la position des surfaces ravivées et de la direction des vents dominants. Si la surface ravivée se trouve sous le vent par rapport à la cuvette, la menace est nulle même si cette zone est proche de la cuvette. On pourrait attribuer un poids en fonction de la direction : risque maximum si située au NE, moindre si E et N, etc... Dans cette étude, l'indicateur de menace des cuvettes n'a pas pris en compte la direction des vents dominants d'Harmattan.
- déterminer d'autres variables explicatives du niveau d'exploitation agricole d'une cuvette. Ces variables peuvent être le nombre d'exploitations par cuvettes, la population des villages utilisant une cuvette, le niveau de la nappe de chaque cuvette, le niveau de revenu des exploitants.
- développer une interface webmapping pour valoriser les résultats de l'outil à travers Internet. Cette phase consistera à la création de services web avec MapServer par exemple et le développement de l'interface cartographique web. La mise en place d'une interface webmapping permet de consulter les résultats de nos recherches au clic sur la carte. Il s'agira donc de construire et de mettre en ligne une carte interactive et dynamique des cuvettes oasiennes du Département de Gouré ainsi que les autres couches qui constituent le modèle physique des données (dune vive, village, zone de fixation de dune, commune, marché). Cette application se veut être un outil d'aide, un guide pour toute personne qui souhaite consulter les informations de la géodatabase sur internet sans difficulté. L'intérêt d'une telle plate-forme réside en sa capacité de fournir l'information géographique couplée à sa description pour mieux orienter les acteurs intervenant sur les cuvettes oasiennes.
- valider l'outil de monitoring sur le terrain et l'élargir aussi à toute la zone d'étude à toute « aire cuvettes » du sud-est nigérien (Département de Gougoumaria et de Mainé Soroa).

## REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- Abdou M. (2013)** - *Effets des feux de brousse et des pare-feux sur le sol et la végétation herbacée à Gouré – Région de Zinder*, mémoire de fin d'étude, Faculté d'Agronomie, Université Abdou Moumouni, 92p.
- Abdou Y. et Adji A.K. (2009)** - Opportunité et viabilité économiques des opérations de traitement des dunes de sable dans le Département de Gouré au Niger : cas des villages de Balla, Sissia et Lafia, *Géo-Eco-Trop*, **33**, 133 – 140.
- Abdou Y. et Djambouto B. (2009)** - Les justifications et les faisabilités économiques et sociales du traitement des dunes de sable dans le Département de Gouré au Niger : cas du village de Tchago. *Géo-Eco-Trop*, **33**, 125–132.
- 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'Enablement des Cuvettes Oasiennes dans les Départements de Gouré et de Maïné-soroa : possibilités d'exploitation agricole et de valorisation*. Gouré, 53p.
- Andrèn H. (1994)** - Effects of habitat fragmentation on birds and mammals in landscapes with different proportions of suitable habitat. *Oikos*, **3**(71), 355-366.
- Andriessse O. et Fresco L.W. (1991)** - A characterization of Rice growing environments in west Africa. *Agric. Ecosys. and Environ*, **33**, 377–395.
- Antonio D.G. et Louisa J.M. (1998)** - *Land cover classification system (LCCS)- Classification concepts and user manual*, Environment and Natural Resources Service (SDRN), Food and Agriculture Organization of the United Nations, 77p.
- Arvor D., Jonathan M., Meirelles M. et Dubreuil V. (2008)** - Detecting outliers and asserting consistency in agriculture ground truth information by using temporal vi data from MODIS. *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, Vol. XXXVI(Part B7), 1031–1036.
- Assami T., Hamdi-Aissa B., Halitim A., Mostefaoui T. et Rouahana H. (2014)** - Apport de la télédétection dans l'étude de la relation entre états de

- surface et pédopaysages en milieu aride: exemple de la région d'el Outaya (biskra, algerie). *Algerian Journal of Arid Environment*, **4**, 60–71.
- Aufrère L. (1934)** - Les dunes du Sahara algérien (notes de morphologie dynamique). *Bulletin de l'Association de Géographes Français*, **11**(83), 130–142.
- Bamba I. (2010)** - Anthropisation et dynamique spatio-temporelle de paysages forestiers en République démocratique du Congo. Thèse de doctorat, Université Libre de Bruxelles, 205 pages.
- Bar-Hillel A., Hertz T., Shental N. et Weinshall D. (2005)** - Learning a mahalanobis metric from equivalence constraints. *Journal of Machine Learning Research*, **6**(6), 937–965.
- Ben Salah M. (2002)** - *Rapport d'expertise technique sur la biodiversité oasienne en Tunisie*. Tunisie 62p. Retrieved from <http://www.raddo.org/ressourcotheque/files/Exp.-Biodiv.-B.S..pdf?PHPSESSID=ea3ae47299282c880d8c2c66ce4d75f8>
- Bendjoudi H. et Hubert P. (2002)** - Le coefficient de compacité de Gravelius: analyse critique d'un indice de forme des bassins versants. *Hydrological Sciences Journal*, **47**(6), 921–930.
- Bodart C. et 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 ). *Géo-Eco-Trop*, **33**, 57–68.
- Bodart C., Ozer A. et Derauw D. (2010)** - Suivi de l'activité des dunes au Niger au moyen de la cohérence interférométrique ERS 1/2. *Bulletin de la Société Géographique de Liège*, **54**, 123–136
- Boukar Krou A. (2016)** - *Système d'exploitation et potentialités économiques des cuvettes oasiennes du sud-est du Niger* ; Thèse de doctorant Université Abdou Moumouni, 214p.
- Boukari D. (2013)** - *Effets socio-économiques et environnementaux de la fixation des dunes dans la zone d'intervention du PLECO du département de Gouré – Niger*, Mémoire de DESS, Faculté d'Agronomie, Université Abdou Moumouni de Niamey
- Bouyer J. (1991)** - La régression logistique en épidémiologie. I. *Revue d'épidémiologie et de santé publique*, **39**(1), 79-87.

- Brodeur J., Bédard Y. et Proulx M. J. (2000)** - Modelling geospatial application databases using UML-based repositories aligned with international standards in geomatics. In *Proceedings of the 8th ACM international symposium on Advances in geographic information systems* (pp. 39-46). ACM.
- Capot-Rey R. (1939)** - Pays du Mzab et région des dayas: Etude sur le relief de la dorsale saharienne. In *Annales de Géographie*, Armand Colin., **271**, 41-62.
- Capot-Rey R. (1970)** - Remarques sur les ergs du Sahara. *Annales de Géographie*, 79(431), 2–19.
- Christian L., Marc L. et Salifou O. (1998)** - Evolution des ressources en eau dans le departement de Diffa ( bassin du lac Tchad , sud- est nigerien ). *Water Resources Variability in Africa during the XXth Century (Proceedings of the Abidjan 98 Conference Held at Abidjan, Cote d'Ivoire)*, IAHS Publ.(november 1998), 281–288.
- Cleve C., Kelly M., Kearns F.R. et Moritz M. (2008)** - Classification of the wildland-urban interface: a comparison of pixel- and object-based classifications using high-resolution aerial photography. *Computers, Environment and Urban Systems*, **32**, 317–326.
- Congalton R. G. (1991)** - A Review of Assessing the Accuracy of Classifications of Remotely Sensed Data. *Remote Sens. Environ.*, **37**, 35–46.
- Coque R (1962)** - La Tunisie présaharienne, étude géomorphologique. Ed colin, Paris. Thèse d'état, 488 p
- Courel M. F. (1984)** - *Etude de l'évolution récente des milieux sahéliens à partir des mesures fournies par les satellites*. Thèse de doctorat, Université Panthéon-Sorbonne-Paris I, 408p.
- Dardel S. et Populin M. (2013)** - *Étude sur le fonctionnement des marches ruraux de demi-gros et les flux de commercialisation des produits agropastoraux des régions de Tahoua, Maradi et Zinder*, étude réalisée avec l'appui de la coopération Italienne, 75pp
- Definiens professional 8.7. (2011)** - *eCognition® Developer 8.7. Reference Book* (p. 438). Germany.

- Desconnets J. C. (1994)** - Typologie et caractérisation hydrologique des systèmes endoréiques en milieu Sahélien (Niger-degré carré de Niamey). Thèse de doctorat, Université de Montpellier 2, 326p.
- Desjardins J. (2005)** - L'analyse de régression logistique. *Tutorial in quantitative methods for psychology*, **1**(1), 35-41.
- Djambouto B. (2005)** - *Etude socio-économique des cuvettes dans le Département de GOURE : cas des sites de Tchago et de Woro*. Faculté d'Agronomie, Université de Niamey, p52.
- DRE/Zinder (2010)** - *Rapport de la mission d'identification et caractérisation des filières porteuses dans le domaine de l'Environnement*, 46 pp.
- Duchaufour P., Souchier B. et Bonneau M. (1994)** - *Constituants et propriétés du sol*. Masson. Pédologie. Tome 2: 665p.
- Durand A. et Lang J. (1986)** - Approche critique des méthodes de reconstitution paléoclimatique: le Sahel nigérotchadien depuis 40 000 ans. *Bulletin de la Société géologique de France*, **8**, 267-78.
- Durand A. et Mathieu P. (1980)** - Evolution paléogéographique et paléoclimatique du bassin tchadien au Pléistocène supérieur. *Revue de Géologie Dynamique et de Géographie Physique*, **22**(4-5), 329-341.
- Duro D.C., Franklin S.E. et Dubé M.G. (2012)** - A comparison of pixel-based and object-based image analysis with selected machine learning algorithms for the classification of agricultural landscapes using SPOT-5 HRG imagery. *Remote Sensing of Environment*, **118**, 259–272.
- El Kharki O., Mechbough J., Rouchdi M., El Aboudi A. et. Ngonon J. M. (2015)** - Les effets du niveau de l'échelle et de la résolution spatiale sur la classification orientée objet : Application à la cartographie de l'Arganeraie (Région Agadir, Maroc), *International Journal of Innovation and Scientific Research*, **14**, 21-31.
- Etienne P. (2008)** - *Effet de la salinité sur la compétition entre le roseau (*Phragmites australis*) et les quenouilles (*Typha spp.*)*. Thèse de doctorat: Université de Montréal. Département de sciences biologiques. 103 p. (Canada).

- Fleiss J. L. et Cohen J. (1973)** - The equivalence of weighted kappa and the interclass correlation coefficient as measures of reliability. *Educ. Psycho. Mans.*, **33**, 613–619.
- Fontes J. C. et Gasse F. (1991)** - PALHYDAF (Palaeohydrology in Africa) program: objectives, methods, major results. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, **84**(1-4), 191-215.
- Fontes J.C., Gasse, F. et Andrews J. N. (1993)** - Climatic conditions of Holocene groundwater recharge in the Sahel zone of Africa. *IAEA Conference Proceeding Isotope techniques in the study of past and current environmental changes in the hydrosphere and the atmosphere, Vienna* pp 213-248.
- Frankhauser P. (1990)** - Aspects fractals des structures urbaines. *Espace Géographique*, **19**(1), 45–69.
- Frankhauser P. (1997)** - L'approche fractale. Un nouvel outil de réflexion dans l'analyse spatiale des agglomérations urbaines. *Population (french Edition)*, **4**, 1005–1040.
- Franklin S. E., Hall R. J., Moskal L. M., Maudie A. J. et Lavigne M. B. (2000)** - Incorporating texture into classification of forest species composition from airborne multispectral images. *International Journal of Remote Sensing*, **21**(1), 61–79.
- Franklin S. E., Maudie A. J. et Lavigne M. B. (2001)** - Using spatial co-occurrence texture to increase forest structure and species composition classification accuracy. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, **67**(7), 849–856.
- Gaultier G. (2004)** - *Étude hydrodynamique et géochimique de la nappe Quaternaire du nord-ouest du lac Tchad (Niger oriental)*. Université Paris XI, 189p.
- Gavaud M. et Bocquier G. (1964)** - *Etude pédologique du Niger oriental*. Rapport général. Tome I et II. ORSTOM. 347 pages.
- George P. et Verger F. (2013)** - *Dictionnaire de la géographie*, Paris, PUF, collection Quadrige, 478 p.
- Gondard P. (1986)** - *Le zonage paysagique*, Contribution au package formation FAO Analyse du milieu, préalable à l'élaboration d'un projet, ORSTOM Montpellier, 26p.

- Greigert J. (1978)** - *Atlas des eaux souterraines du Niger : état des connaissances*, Tome 1. Bureau de recherches géologiques et minières : agence d'études de géologie appliquée à l'étranger. 438p.
- Greigert J. et Bernert G. (1979)** - *Atlas des eaux souterraines de la République du Niger. Etat des connaissances*, Rapport BRGM 79 AGE 001. Orléans, France.
- Greigert J. et Pougnet R. (1967)** - *Essai de description des formations géologiques de la République du Niger* (p. 367). Dir. Min. Béol. Niger – Publication N° 3
- Guo Z., Zhang L. et Zhang D. (2010)** - Rotation invariant texture classification using LBP variance (LBPV) with global matching. *Pattern Recognition*, **43**(3), 706–719.
- Halley J. M., Hartley S., Kallimanis A. S., Kunin W. E., Lennon J. J. et Sgardelis S. P. (2004)** - Uses and abuses of fractal methodology in ecology. *Ecology Letters*, **7**, 254–271.
- Hanarou S. (2011)** - *Dégradation des terres dunaires et efficacité des mesures antiérosives correctives (Cas des amas dunaires du secteur Kilakina/Gouré)*, Mémoire Centre Régional d'Enseignement Spécialisé en Agriculture, Faculté d'Agronomie, Université Abdou Moumouni de Niamey, 82p
- Haralick R. M., Shanmugam K. et Dinstein I. (1973)** - Textural Features for Image Classification. *Systems, Man and Cybernetics, IEEE Transactions on*, **3**(6), 610-621.
- Harouna M. (2005)** - Étude de la filière des produits du palmier doum en perspective de mise en place d'un marché rural au niveau de la grappe de El gueza (AGUIE). Mémoire de DESS CRESA, Faculté d'Agronomie, Université Abdou Moumouni 87p.
- Hauchard E., Delahaye D. et Freiré-Díaz S. (2002)** - Organisation fractale de l'occupation du sol: conséquences sur le ruissellement et le ravinement dans les terres de grande culture, *Géomorphologie: relief, processus, environnement*, **8**(2), 181-196.
- Hodgson M. E. (1998)** - What size window for image classification? A cognitive perspective. *PE & RS- Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*, **64**(8), 797-807.

- Huffman E. et Dumanski J. (1985)** - Agricultural land use systems : an economic approach to rural land use inventory. *Journal Soil Water Conservation*, **40**, 302 – 306.
- Ibrahim S., Ousseini I. et Ambouta K. (2009)** - Analyse comparée et interprétation des caractéristiques granulométriques des systèmes dunaires sahéliens et sahariens de l'est du Niger, *Géo-Eco-Trop*, **33**, 31-38.
- Idbraim S. (2009)** - *Méthodes d'extraction de l'information spatiale et de classification en imagerie de télédétection : Applications à la cartographie thématique de la région d'Agadir (Maroc)*. Université Med V-Agdal et Université Paul Sabatier de Toulouse, 133p.
- IGN Paris (1962)** - Carte topographique de l'Afrique de l'Ouest au 1/200.000, Gouré, Feuille ND 32 XI, IGN, Paris, 1962.
- Imre A. R. et Bogaert J. (2004)** - The fractal dimension as a measure of the quality of habitats. *Acta Biotheoretica*, **52**(1), 41–56.
- INS (2010)** - *Annuaire statistique de cinquante ans d'indépendance du Niger, Edition spéciale*. Institut national de statistique (INS) du Niger.
- INS (2014)** - *Le Niger en Chiffres 2014*. Institut national de statistique (INS) du Niger, 77p.
- Issa A., Mahamane A., Tidjani A. D., Gandou Z. et Issaka A. (2009)** - *État de référence des observatoires de Diffa, Zinder, Azawad Et Torodi-Tondikandia*, Dispositif National de Surveillance Environnementale / Réseau d'Observatoires de Surveillance Ecologique à Long Terme du Niger (DNSE/ROSELT), 131p.
- Jahiel M. (1993)** - Effet des récentes perturbations climatiques sur la phéniculture dans le sud-est du Niger. *Sécheresse*, **4**, 7–16.
- Jahiel M. (1998)** - Rôle du palmier dattier dans la sécurisation foncière et alimentaire au sud-est du Niger. *Sécheresse*, n° 2, **9**, 167–174.
- Jenks G. F. (1963)** - Generalization in statistical mapping. *Annals of the Association of American Geographers*, **53**(1), 15–26.
- Joliveau T. (2004)** - *Géomatique et gestion environnementale du territoire: recherche sur un usage géographique des SIG* (Doctoral dissertation). 495p.

- Kanembou L. (2007)** - *Etude de la dynamique des aires pastorales dans le Département de Gouré : Apport de la télédétection et du SIG*. Université Abdou Moumouni de Niamey, Département de Géographie, pp 79.
- Kanembou L. et Karimoune S. (2013)** - Processus d'ensablement des cuvettes et suivi par télédétection dans le Département de Gouré, Niger. *Revue de Géographie de l'Université de Ouagadougou*, **002**, 173 –197.
- Karimou Barké M. (2005)** - *Caractérisation morpho-pédologique des cuvettes de Tchago et Worro (dans le Département de Gouré)*. Université Abdou Moumouni, 87p.
- Karimou Barké M., Karimou Ambouta, Sarr Benoit (2015a)** - *Analyse des phénomènes climatiques extrêmes dans le sud-est du Niger : impacts environnementaux et stratégies d'adaptation de la population*. OMN.UNIV.EUROP. 125p.
- Karimou Barké M., Ambouta K. et Sarr B. (2015b)** - Analyse des phénomènes climatiques extrêmes dans le sud-est du Niger. *Publications de l'Association Internationale de Climatologie*, **28**, 537-542.
- Karimoune S. (1994)** - Géomorphologie de la région de Zinder (Niger) Damagaram et plateau du Koutous. Thèse de doctorat, Université de Liège, *Géo-Eco-Trop*, **18**, 1-218.
- Karimoune S. et Ozer A. (1994)** - L'apport de la télédétection à l'étude des modelés éoliens du Niger méridional. *Télédétection de L'environnement Dans L'espace Francophone*, in *Presse de l'Université Du Québec*, **2**, 32–54.
- Karimoune S., Alexandre J. et Ozer A. (1993)** - Suivi par télédétection de l'évolution de la désertification dans la région de Zinder (Niger). *Télédétection et Cartographie*, 151–159.
- Karimoune S., Ozer A. et Erpicum. M. (1990)** - Les modelés éoliens de la région de Zinder (Niger méridional), étude de photogéomorphologie, note préliminaire. *Télédétection et Sécheresse. Edition AUPELF-UREF*, 145–161.
- Laplanche F. (2002)** - Conception de projet SIG avec UML. *Bulletin de la Société géographique de Liège*, **42**, 19-25.

- Latry C. et Rougé B. (2003)** - Super resolution: quincunx sampling and fusion processing. In *Geoscience and Remote Sensing Symposium, 2003. IGARSS'03. Proceedings. 2003 IEEE International*, **1** 315-317.
- Latry C., Rougé B. et Baillarin S. (2001)** - La chaîne image SPOT5 THR: un exemple d'optimisation globale. In *18<sup>o</sup> Colloque sur le traitement du signal et des images, FRA, 2001*. GRETSI, Groupe d'Etudes du Traitement du Signal et des Images, 5p.
- Lefebvre A., Corpetti T. et Hubert-Moy L. (2011)** - Ondelettes et théorie des évidences pour la classification orientée-objet. *Géomatique et Occupation Des Sols, RIG-21*, 29 –325.
- Lekouch I., Rognon P., Kabbachi B., Benssaou M. et Ezaidi A. (2010)** - Essai de morphométrie sur un système dunaire du sud-ouest marocain à partir d'une image Landsat. *Science et Changements planétaires/Sécheresse*, **21**(1), 54–62.
- Leruth F. (2000)** - Les mosaïques d'images. *Bulletin de la Société Géographique de Liège*, **38**(1), 95-106.
- Lindsay J.B. (2010)** - *Whitebox Geospatial Analysis Tools Tutorial Series*. Centre for Hydrogeomatics, The University of Guelph, Guelph, 15p.
- Lindsay J.B. (2014)** - The Whitebox Geospatial Analysis Tools project and open-access GIS,. In 16-18 April. The University of Glasgow (Ed.), *Proceedings of the GIS Research UK 22nd Annual Conference* (p. 8). The University of Glasgow, 16-18 April.
- Mainguet M. (1975)** - Etude comparée des ergs, à l'échelle continentale (Sahara et déserts d'Australie). *Bulletin de l'Association de Géographes Français*, **52**(424-425), 135–140.
- Mainguet M. et Callot Y. (1978)** - *L'erg de Fachi-Bilma (Tchad-Niger): contribution à la connaissance de la dynamique des ergs et des dunes des zones arides chaudes*. Ed. du Centre national de la recherche scientifique, 184p.
- Mainguet M., Chemin M. C. et Borde J. M. (1985)** - Etude du rôle des obstacles topographiques dans la circulation éolienne d'après les images satellites et les photographies aériennes, de l'échelle continentale à celle de la butte-témoin. *Méditerranée*, **54**(1-2), 11–19.

- Malam A. M. (2010)** - *Exploitation agricole des cuvettes oasiennes du manga et gestion de la fertilité des sols « cas du Département de Goure »*, mémoire de fin d'étude en vue de l'obtention du diplôme d'Ingénieur Agronome Option : Phytotechnie (Production Végétale), Faculté d'Agronomie, Université de Niamey, 64p.
- Maley J. (1993)** - Chronologie calendaire des principales fluctuations du lac Tchad au cours du dernier millénaire. Le rôle des données historiques et de la tradition orale. *IN Datation et Chronologie dans le Bassin du lac Tchad. ORSTOM, Paris, Séminaire du Réseau Méga-Tchad, Sept.1989, 161-163.*
- Maley J. (2000)** - Les variations des niveaux du lac Tchad au cours du dernier millénaire: Rôle des conditions climatiques régionales et des apports fluviaux. Comparaison avec le lac Naivasha en Afrique orientale. *Bulletin Méga-Tchad, 2000 (1/2), 21-26.*
- Maley J. (2004)** - Le bassin du Tchad au Quaternaire récent : formations sédimentaires, paléoenvironnements et préhistoire. La question des Paléotchads. In *Guide de la Préhistoire mondiale*. eds, p.179-217. Publ. Artcom - Errance, Paris.
- Mama A., Sinsin B. De Cannière C. et Bogaert J. (2013)** - Anthropisation et dynamique des paysages en zone soudanienne au nord du Bénin. *Tropicultura, 31(1), 78-88.*
- Mandelbrot B. (1984)** - *Les objets fractals: formes, hasard et dimension*, (deuxième éd.), Flammarion, Paris 125p.
- Miquel M., Bédard Y., Brisebois A., Pouliot J., Marchand P. et Brodeur J. (2002)** - Modeling multi-dimensional spatio-temporal data warehouses in a context of evolving specifications. *International Archives of Photogrammetry Remote Sensing and Spatial Information Sciences, 34(4), 142-147.*
- Miralles A., Libourel T. et Maurel P. (2004)** - Méthodologie d'aide à la conception de Systèmes d'Information Géographique. In *Colloque ALCAA* (pp. 17-33).
- Mohammed A. et Rusthum. S. (2010)** - Object-oriented image processing of an high resolution Satellite imagery with perspectives for Urban growth, planning and development. *International Journal of Image Processing, Computer Science Journals, 2, 18-28.*

- Mostephaoui T. et Bensaid R. (2014)** - Caractérisation des sols gypseux dans les zones arides par télédétection cas du sous-bassin versant d'oued djedi-biskra. *Lebanese Science Journal*, Vol. **15**, N, 99–115.
- Musy A. et Higy C. (2004)** - *Hydrologie 1: une science de la nature*. Presses Polytechniques, Ed., 314p.
- Nikolakaki P. (2004)** - A GIS site-selection process for habitat creation: Estimating connectivity of habitat patches. *Landscape and Urban Planning*, **68**, 77–94
- Oloukoi J. et Mama V. (2009)** - Dynamique agraire des agro de bas-fonds au centre du Bénin. *Agronomie Africaine*, **21**, 117 – 128.
- Ousmane B. (1978)** - Contribution à l'étude hydrogéologique de socle du Sahel l'hydrogéologie de Damagaram Occidental (environs de Zinder Niger), (Doctoral dissertation, Thèse spécialité, Univ. Montpellier II, France), 123p.
- Ousmane B. (1988)** - Etude géochimique et isotopique des aquifères du socle de la bande sahéenne du Niger (Liptako, sud Maradi et Zinder Est), Thèse de doctorat d'état, Université Abdou Moumouni. 175p.
- Ozer A. et Ozer P. (2005)** - Désertification au Sahel: Crise climatique ou anthropique?. *Bulletin des Séances de l'Académie Royale des Sciences d'Outre-Mer= Mededelingen der Zittingen van de Koninklijke Academie voor Overzeese Wetenschappen*, **51**(4), 395-423.
- Ozer P. (2001)** - Les lithométéores en régions sahéennes. *Revue Internationale d'Ecologie et de Géographie Tropicale* **24**, 317 p.
- Ozer P., Bodart C. et Tychon B. (2004)** - Analyse climatique de la région de Gouré, Niger oriental: récentes modifications et impacts environnementaux. *Cybergeo : European Journal of Geography*, 308, 24, doi:%2010.4000/cybergeo.3338.
- Ozer P., Hountondji Y. et Laminou Manzo O. (2009)** - Evolution des caractéristiques pluviométriques dans l'est du Niger de 1940 à 2007. *Géo-Eco-Trop*, **33**, 11-30.
- Ozer P., Hountondji Y., Niang A. J., Karimoune S., Laminou Manzo O. et Salmon M. (2010)** - Désertification au Sahel: historique et perspectives. *Bulletin de la Société Géographique de Liège*, **54**, 69-84.

- Pan J., Wang M., Li D. et Li J. (2009)** - Automatic generation of seamline network using area Voronoi diagrams with overlap. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 47(6), 1737-1744.
- Paszto V., Marek L. et Tucek P. (2011)** - Fractal Dimension Calculation for CORINE Land-Cover Evaluation in GIS-A Case Study. In *DATESO (Databases, Texts, Specifications, and Objects )* (pp. 196–205). Písek/Tchèque.
- Perumal K. et Bhaskaran R. (2010)** - Supervised classification performance of multispectral images. *Journal of Computing*, 2(2), 126–129.
- PGRN (1997)** - *Etude monographique de l'arrondissement de Gouré*, Projet de Gestion des Ressources Naturelles, 85p.
- PIC (2011)** - *Formulaire d'introduction du projet « préservation des cuvettes oasiennes et de leur rôle socio-économique dans le sud-est du Niger »* pp 70.
- Pierra G., Hondjack D., Ameer Y. A. et Bellatreche L. (2005)** - Bases de données à base ontologique. Principe et mise en oeuvre. *Ingénierie des systemes d'information*, 10(2), 91-115.
- Pinet F., Lbath A., Vigier F. et Schneider M. (2003)** - Conception de systèmes d'information à référence spatiale (SIRS) communicants pour les agrosystèmes. Vers une approche méthodologique adaptée aux spécificités et aux nouveaux besoins du secteur agricole. *Ingénieries*, 2 143-155.
- Pinet F., Miralles A., Bimonte S., Vernier F., Carluer N., Gouy V. et Bernard S. (2010)** - The use of UML to design agricultural data warehouses. In *AgEng: Agricultural Engineering*.
- Pion J. C., Besnus Y., Yesou H. et Deynoux M. (1990)** - Essai de caractérisation géométrique des différentes unités d'un erg actif à l'aide des données satellitaires panchromatiques SPOT, application à l'erg Akchar (Mauritanie occidentale). In T. (SEN) (Ed.), *Apports de la Télédétection à la Lutte contre la Sécheresse : Journées Scientifiques*, Thiès (SEN), pp. 229–240
- Pirard F. (1966)** - Geomorphologie du Manga nigerien. Schéma d'évolution Quaternaire du secteur nord-occidental de la cuvette du Tchad. *Bull. Inst. Fr. Afr. Noire Dakar*, 28, 421-425.

- Pirot F. et Saint-Gérard T. (2005)** - La Géodatabase sous ArcGIS, des fondements conceptuels à l'implémentation logicielle. *Géomatique Expert*, 41(42), 61-66.
- PLECO (2006)** - *Cartographie de la situation de l'ensablement de la zone d'intervention du Projet de Lutte Contre l'Ensablement des Cuvettes Oasiennes dans les Départements de Gouré et de Maïné-soroa (PLECO)*. 66p.
- PLECO (2010)** - *Identification des zones les plus menacées par l'invasion des dunes de sable dans la zone d'intervention du Projet de Lutte Contre l'Ensablement des Cuvettes Oasiennes dans les Départements de Gouré et de Maïné-soroa PLECO*, pp 47.
- Pouget M. (1980)** - *Les relations sol-végétation dans les steppes sud-algéroises*. O.R.S.T.O.M. - Paris - 458p.
- Qian J., Zhou Q. et Hou Q. (2007)** - Comparison of pixel-based and object-oriented classification methods for extracting built-up areas in aridzone. In *ISPRS Workshop on Updating Geo-spatial Databases with Imagery et The 5th ISPRS Workshop on DMGISs* (pp. 163– 171).
- Rakotomalala R. (2011)** - Pratique de la régression logistique. *Régression Logistique Binaire et Polytomique, Université Lumière Lyon*, 2, 258p.
- Richard J-F. (1989)** - Méthode d'analyse des paysages, *Éditions de l'ORSTOM, Collection Initiations - Documentations Techniques n° 72*, 62p
- Roche M. (1963)** - *Hydrologie de surface*. (ORSTOM and Gauthier-Villars Paris, Ed.). Office de la Recherche Scientifique et Technique Outre-Mer - (Paris). p 431
- Roland B. et Fleurant C. (2004)** - Caractérisation des formes du bocage à l'aide de la géométrie fractale. *L'Espace Géographique*, 33(2), 165–174.
- SAA/Gouré (2000)** - *Inventaire et utilisations agro-pastorales des cuvettes de l'arrondissement de Gouré*. Service d'Arrondissement de l'Agriculture de Gouré, République du Niger, 21p.
- Salem B. (1988)** - *Manuel de fixation des dunes* (Vol. 18). Food & Agriculture Org. 57p
- 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 de Niamey, 178p.

**Savadogo O. M., Ouattara K., Barron J., Ouedraogo I., Gordon L., Enfors E. et Zombre N. P. (2015)** - Etats des écosystèmes sahéliens: reverdissement, perte de la diversité et qualité des sols. *Afrique SCIENCE*, *11*(5), 433-446.

**Schaefer J. T. (1990)** - The Critical Success Index as an Indicator of Warning Skill. *Weather and Forecasting*, *5*, 570–57.

**Sebag D., Durand A., Garba Z., Lang J. et Verrecchia E. P. (2006)** - Dynamique sédimentaire et diagenétique d'un lac interdunaire holocène en milieu subaride ( N ' Guigmi , lac Tchad , Niger ). *Africa Geoscience Review*, *Vol. 13*, N, 409–424.

**Sendzimir J., Reij C. P. et Magnuszewski P. (2011)** - Rebuilding resilience in the Sahel: regreening in the Maradi and Zinder regions of Niger. *Ecology and Society*, *16*(3), 1.

**Servant M. (1967)** - Données stratigraphiques sur le Quaternaire supérieur et récent au nord-est du lac Tchad. –VIe Congr. Panaf, Préh. Et. Quat. *Cah. ORSTOM, Sér. Géol*, *2*(1), 95-114.

**Servant M. (1970)** - Données stratigraphiques sur le Quaternaire supérieur et récent au nord-est du lac Tchad. *Cah. ORSTOM*, *II*, 95–114.

**Servant M. et Servant S. (1970)** - Les formations lacustres et les diatomées du Quaternaire récent du fond de la cuvette tchadienne. *Revue de Géographie Physique et de Geologie Dynamique*, *XII*, 63–76.

**Sparfel L., Gourmelon F. et Le Berre I. (2010)** - Approche orientée-objet de l'occupation des sols en zone côtière. *Téledétection*, *8*, 237–256.

**Thomas H., Collet C., Yao, K. et Burel G. (2000)** - Classification de textures en imagerie sonar et Invariance en rotation Sonar texture classification and rotation invariance. *Traitement Du Signal*, *17*, 1–19.

**Tidjani A. D. (2008)** - *Erosion éolienne dans le Damagaram Est (Sud-Est du Niger): Paramétrisation, quantification et moyens de lutte*, Thèse de doctorant de l'Université catholique de Louvain, 193p

**Tidjani A. A., Ozer A. et Karimoune S. (2009c)** - Apports de la télédétection dans l' étude de la dynamique environnementale de la région de Tchago (nord-ouest de Gouré , Niger ), *Géo-Eco-Trop*, *33*, 69–80.

- Tidjani A. D., Ambouta K. J-M. et Bielders C. (2009a)** - Réhabilitation d'une dune vive par fixation mécanique : flux éoliens, fertilité du sol et biodiversité des herbacées. *Géo-Eco-Trop*, **33**, 81–98.
- Tidjani A. D., Bielders C. L. et Ambouta K. J-M. (2009b)** - Dynamique saisonnière des paramètres déterminant l'érosion éolienne sur les pâturages dunaires du Niger. *Géo-Eco-Trop*, **33**, 39–56.
- Toutain G., Dollé V. et Ferry M. (1989)** - Situation des systèmes oasiens en régions chaudes. *Cahiers de la Recherche Développement*, (**22**). 6-18
- Tricart J. et Cailleux. A. (1970)** - *Le modelé des régions sèches. Traité de géomorphologie*. Tome IV. SEDES. Paris. Presses Universitaires de Rennes, 472p.
- Tuceryam M. et Jain A. K. (1998)** - Texture analysis. In *The handbook of pattern recognition and computer* (Vol. vision, **2**, pp. 1-41).
- Tychon B., Ambouta K. J. M. (2009)** - Gestion interdisciplinaire du problème d'ensablement des cuvettes en milieu sahélien nigérien. *Géo-Eco-Trop*, **33**, 1–10.
- Tychon B., Ambouta K. J. M., Ozer A., Bielders C., Paul R., et Ozer P. (2009)** - Perspectives-Quel avenir pour les cuvettes oasiennes dans le Niger oriental? *Géo-Eco-Trop*, **33**, III-VI.
- Wang L. (2004)** - Integration of object-based and pixel-based classification for mapping mangroves with IKONOS imagery. *INT. J. REMOTE SENSING.*, **25**(24.), 5655–5668.
- Waziri M. (2000)** - *Les cultures de contre saisons dans le sud de la région de Zinder*. Thèse de doctorat. Université de Lausanne. 358 pages.
- Wellens J. (2014)** - *Un cadre pour l'utilisation des outils d'aide à la décision à diverses échelles spatiales pour la gestion de l'agriculture irriguée en Afrique de l'Ouest*. Thèse de doctorat, Université de Liège, Belgique, 100 pages.
- Whiteside T. et Ahamat W. (2005)** - A comparison of object-oriented and pixel-based classification methods for mapping land cover in northern Australia. In *Proceedings of SSC2005 Spatial intelligence, innovation and praxis: The national biennial Conference of the Spatial Sciences Institute, september 2005. Melbourne: Spatial Sciences Institute* (pp. 1225–1231).

- Willhauck G. (2000)** - Comparison of object oriented classification techniques and standard image analysis for the use of change detection between SPOT multispectral satellite images and aerial photos. *ISPRS*, **33**, 35-42.
- Yuan F. et Bauer M. E. (2006)** - Mapping impervious surface area using high resolution imagery: a comparison of object-based and per pixel classification. In *ASPRS 2006 Annual Conference*, 8p. Reno, Nevada.
- Zairi R. (2008)** - *Etude géochimique et hydrodynamique de la nappe libre du Bassin du lac Tchad dans les régions de Diffa (Niger oriental) et du Bornou (nord-est du Nigeria)*, Thèse de doctorat, Université Montpellier II, 191p.
- Zhang C., Franklin S. E. et Wulder M. A. (2004)** - Geostatistical and texture analysis of airborne-acquired images used in forest classification. *International Journal of Remote Sensing*, **25**(4), 859–865.

## ANNEXES : LISTE DES PUBLICATIONS

### Annexe 1 : Articles publiés

**Karimou B. M., Tychon B., Ousseini I., Ozer A. (2017)** - Détection des cuvettes oasiennes du centre-est du Niger par classification d'images texturales basée sur la variance, *Revue Photo-Interprétation: European Journal of Applied Remote Sensing*. vol 5 N°2015/3, pp24-36.

**Karimou Barké M., Ambouta K., Sarr B. et Tychon B. (2015)** - (2015). Analyse des phénomènes climatiques extrêmes dans le sud-est du Niger. *Publications de l'Association Internationale de Climatologie*, 28, 537-542.

**Karimou Barké M., Ambouta K. et Sarr B. (2015)** - *Analyse des phénomènes climatiques extrêmes dans le sud-est du Niger: impacts environnementaux et stratégies d'adaptation de la population*. OMN.UNIV.EUROPE. 125p.

**Karimou Barké M., Ambouta K. et Tydjani A. D. (2015)** - Cartographie des potentialités agricoles et forestières de la région Maradi. In *Colloque scientifique international « Maradi Kwalliya »* du 14 au 16 décembre 2015, <http://orbi.ulg.be/handle/2268/200470>

### Annexe 2 : articles en cours de publication

**Karimou B. M., Tychon B., Ousseini I. et Ozer A. (2016)** - Détection des cuvettes oasiennes du centre-est du Niger par classifications d'images satellite SPOT5-THX, *Revue Photo-Interprétation: European Journal of Applied Remote Sensing*, Accepté sous réserve, 17 pages.

**Karimou B. M., Tychon B., Ousseini I. et Ambouta K. (2017)** - Analyse de l'évolution des paysages de cuvettes oasiennes et de leurs alentours dans le centre-est du Niger, *GEO ECO Trop*. Accepté sous réserve.

**Karimou Barké M., Ousseini I., Biolders C., Ambouta K. et Tychon B. (2017)** - Caractérisation morphologique des cuvettes oasiennes. *Physio-Géo. Géographie physique et environnement*. Accepté sous réserve.