



Dynamics of the Agoufou Pond in the Sahel in Malian Gourma

Amidou Goita, Abdoul Kader Kone and Moussa Karembe

EasyChair preprints are intended for rapid dissemination of research results and are integrated with the rest of EasyChair.

June 15, 2020

Titre : Dynamique de la mare d'Agoufou au sahel dans le Gourma Malien.

Amidou GOITA, Abdoul Kader KONE², Moussa KAREMBE³

1. Université des sciences, des techniques et des technologies de Bamako (USTTB) Faculté des sciences et techniques Colline de Badalabougou, ancien Lycée Badala B.P.E2811-FAST223.Bamako Mali (ML). Email : amidougoita@gmail.com
2. Institut d'Economie Rurale (IER) CRRA de Sikasso, BP : 16, Sikasso, Mali. E-mail : dielani2007@yahoo.fr
3. Université des sciences, des techniques et des technologies de Bamako (USTTB) Faculté des sciences et techniques Colline de Badalabougou, ancien Lycée Badala B.P.E2811-FAST223.Bamako Mali (ML). Email : mkarembe@yahoo.fr

Résumé

Après les grandes sécheresses des années 1974 et de 1984 on a constaté dans la zone soudanienne la réduction voire la disparition des ressources hydrologiques surfaciques et souterraines. Mais au sahel dans le gourma c'est le contraire qui se passe, malgré la pluviométrie au-dessous de la moyenne 300 mm par an. Les ressources hydrologiques surfaciques et souterraines ont étonnamment accrues et encore on a constaté la naissance d'autres points d'eau sous l'effet du changement climatique L'objectif du présent travail est d'étudier les effets du changement climatique sur la dynamique de la mare du bassin versant d'Agoufou de 1984 à 2018. La méthodologie adoptée a consisté à la détection des changements de l'occupation du sol à partir de images satellitaires multitudes (ETM et ETM+) couplées avec les sorties terrains afin d'identifier les causes de la pérennisation de la mare et de l'augmentation de son plan d'eau. L'analyse de la dynamique des images a montré qu'entre 1984 et 2018 il y a une augmentation du plan d'eau de 89% soit 278 ha, une progression des sols nus de 22% soit 3650 ha. La progression des sols nus s'explique par l'augmentation de l'aridité et de l'érosion dans les zones en hauteur du bassin. Elle semble être à la base de la pérennisation de l'eau de la mare.

Mots clefs : *Mare, Bassin versant, images satellites, Classification supervisée, Dynamique.*

Abstract :

After the major droughts of 1974 and 1984, the reduction or even disappearance of surface and underground water resources was observed in the Sudanese zone. But in the sahel in the gourma the opposite is true, despite the rainfall below the average of 300 mm per year. Surficial and underground hydrological resources have increased surprisingly and other water points have been created as a result of climate change. The objective of this work is to study the effects of climate change on the dynamics of the Agoufou watershed pond from 1984 to 2018. The methodology adopted consisted in detecting changes in land use using multi-date satellite images (ETM and ETM+) coupled with field trips in order to identify the causes of the pond's sustainability and the increase in its water level. The analysis of the dynamics of the images showed that between 1984 and 2018 there was an increase in the water level of 89% or 278 ha, a progression of bare soils of 22% or 3650 ha. The increase in bare soils is explained by the increase in aridity and erosion in the high areas of the basin. It seems to be the basis for the sustainability of the water in the pond.

Key Words : *Pond, Agoufou watershed Climate change, Malian gourma, satellite images, Supervised classification, Dynamics.*

I. INTRODUCTION

Le déficit pluviométrique a conduit à une diminution des eaux surfaciques et souterraines dans les zones soudanienne et guinéenne de l'Afrique de l'ouest (Descroix et al. 2009). Ce phénomène a vu la diminution de leur étendue d'eau, voire la disparition de certains points d'eau : mare Banzena, mare de Tonzougou-kô ou mare de Dô et lac Aougoudoun, lac Niagaye, lac Wegnia, lac Magui, le lac Korientzé) et les cours d'eau (Niger et Sénégal) (Ballo M. 2012).

Ce phénomène de diminution a été considéré par les chercheurs sus cités comme normale. Après les grandes sécheresses des années 1970 et 1980 et malgré une pluviométrie sous la moyenne des 300 mm d'eau par an au sahel, on a constaté des changements dans les régimes hydrologiques des cours d'eau au Mali, au Burkina Faso, au Niger etc, montrant une augmentation du flux au nord de l'isohyète 700 mm (Mahé et al .2003, 2005a, Ag Mahmoud, 1992).

Le Sahel est particulièrement vulnérable à la variabilité climatique et aux changements d'utilisation des sols. Après les grandes sécheresses des années 1974 et de 1984 on a constaté dans la zone soudanienne la réduction voire la disparition des ressources hydrologiques surfaciques et souterraines (Mahé et al. 2010).

Mais au sahel dans le gourma c'est le contraire qui se passe, malgré la pluviométrie au dessous de la moyenne 300 mm par an, les ressources hydrologiques surfaciques et souterraines ont étonnamment accrues et encore on a

constaté la naissance d'autres points d'eau sous l'effet du changement climatique (Gardelle et al. 2010; Leblanc et al., 2008).

L'étendue de ces points d'eau ne cesse d'accroître année en année, ceux-ci se forment dans les dépressions à fond imperméable et sont plus ou moins permanents en fonction de la quantité de précipitations qui tombent dans leur bassin versant (Kammerud, 1993; Mahé et Paturol, 2009, Hiernaux, 2010).

Pour analyser ce phénomène et son importance les chercheurs l'ont décrit "**paradoxe sahélien**" moins de pluie et plus d'eau surfaciques et souterraines (J. Gardelle, P. Hiernaux, L. Kergoat, et M. Grippa 2010).

Cet état de fait a été l'objet d'une recherche par plusieurs auteurs et projets tels que le HAPEX à travers l'IRD, HEP sahel « Hydrologie, écologie et pastoralisme dans le Sahel : Ressources en eau éphémères et pérennes dans un système dynamique couplé ».

Ces études de ces chercheurs (Hiernaux, Maillé, Grippa, Kergoat etc.), n'ont fourni que des résultats trop larges et peu propices pour tirer des conclusions sur une petite échelle de bassin versant d'où l'idée de présente recherche: de comprendre ce processus et la dynamique de la mare dans le bassin d'agoufou dans un contexte de changement climatique qui et suscite à des objectifs suivants : i) caractériser la dynamique de la mare d'agoufou avant/après les sécheresses de 1974-1984; ii) identifier les facteurs de pérennisation de la mare d'Agoufou dans un contexte de changement climatique; et iii) appréhender l'impact de ces changements sur la pérennisation de la mare d'agoufou.

II. MATERIELS ET METHODE

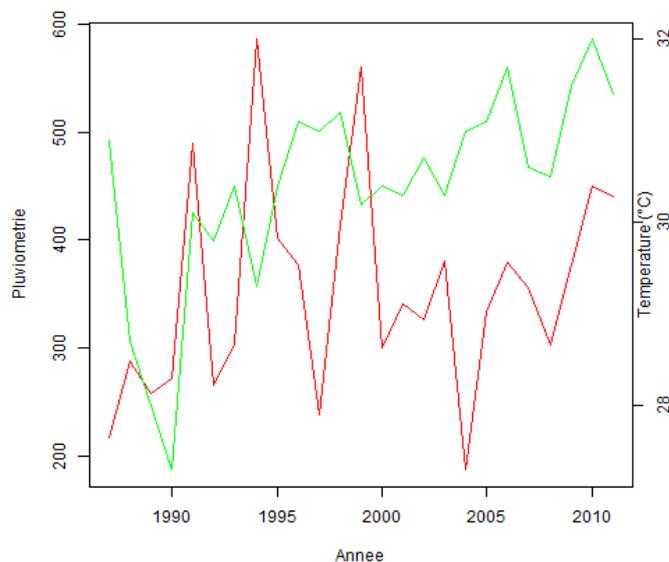
2. 1. Présentation de la zone d'étude

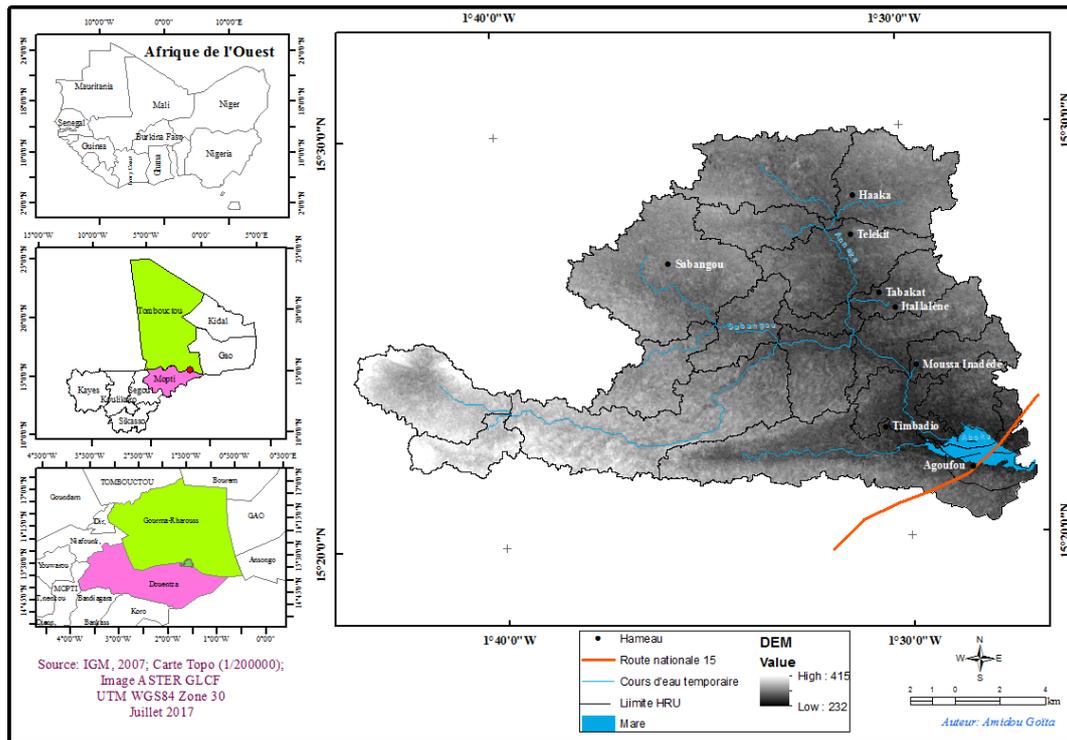
Le bassin de la mare d'Agoufou s'étend entre 1°43'39'' et 1°26'51' de la longitude ouest et 15°20'17'' et 15°30'00'' de la latitude nord. Il couvre une superficie estimée à 28 630 ha avec un périmètre de 17 200 mètres. Il est situé à la limite des communes rurales de Hombori au Nord et à l'ouest de celle Gossi, à la limite sud-est de celle d'Inadjatafane. Au plan administratif, le site est à cheval sur deux cercles, Gourma-Rharous dans la région de Tombouctou et Douentza dans celle de Mopti. Le bassin de la mare d'Agoufou est traversé par la route nationale RN15 reliant Sévaré à Gao sur près de 400 km bitumée.(cf. carte de localisation).

2.1.1. Climat

La pluviométrie moyenne des 24 dernières années est de 353,5 mm au Sahel. Les années les moins pluvieuses sont 1987, 1997 et 2004 avec moins de 186,8 mm tandis que les années les plus arrosées sont 1994, 1999 et 2010 avec plus de 585 mm (DNM, 2013). (cf. fig1).

Figure 1 : Diagramme ombrothermique.





Carte 1 : Localisation de la zone d'étude.

1.1. Collecte de données

Pour cette étude, la méthodologie adoptée a consisté à la détection des changements de l'occupation du sol à partir de images satellitaires multitudes de Landsat (ETM et OLI/TIR) couplées avec les sorties terrains afin d'identifier les types de formations végétales dans le bassin. Les différentes images ont subi plusieurs traitements en fin d'éliminer les effets atmosphériques lors de l'acquisition des images. Il s'agit entre autres :

- ✓ La correction géométrique a permis de régler le calage entre les deux images de Landsat (TM et OLI) afin de faciliter leur superposition. Le système révérenciel WGS84 Zone 29 Nord a été utilisé pour cette correction.
- ✓ Quant à la correction radiométrique consiste à la conversion des valeurs numériques des images en valeur de réflectance.
- ✓ La correction atmosphérique consiste à corriger les effets de l'atmosphère sur les différentes images satellitaires afin d'obtenir des valeurs précises mesurées par les différents capteurs.
- ✓ Dans cette étude, l'outil DOS (Dark Object Subtraction) du logiciel envi 5.1 a été utilisé pour corriger les différentes images.

Les bandes 5, 4 et 3 ont été utilisées pour la composition colorée car elles caractérisent mieux la couverture végétale. Grâce à la connaissance du terrain et la collecte des données des parcelles d'entraînement qui ont permis d'interpréter les différentes images. La méthode de la classification supervisée avec l'algorithme du maximum de vraisemblance a été utilisée en fin de discriminer les unités d'occupations du sol. Elle a permis de mettre en évidence les différentes formes de conversion qu'ont subies les unités entre 1986 et 2018.

Les données spatiales sont essentiellement composées de :

- ✓ Quatre images satellite : deux images Landsat TM du 25/09/1984, du 10/09/1990, du 30/09/2002, du 20/09/2011 et OLI/TIR du 2017 téléchargées sur le site GLCF (Global Land Cover Facility <http://glcfapp.glcg.umd.edu:8080/esdi/>) et le site USGS (United States Geological Survey <http://earthexplorer.usgs.gov/>).

Ces données ont permis d'étudier et d'analyser le plan d'eau de la mare du bassin versant d'Agoufou de 1984 à 2018.

Tableau 1 : Principales caractéristiques des images Landsat

Caractéristiques	Landsat-1 à 3	Landsat-4 et 5	Landsat-6	Landsat-7	LDCM
Début et fin de mission	Landsat-1: 1972-1978 Landsat-2 : 1975-1981	Landsat-4: 1982-1993 Landsat-5 : 1984-2013	1993 (échec)	1999-	2013-11-02

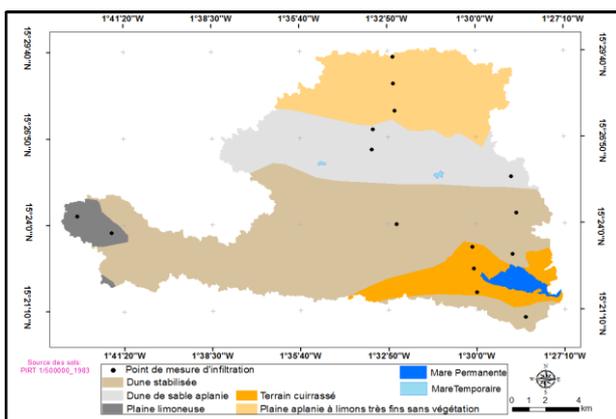
	Landsat-3 : 1982-1993				
Bandes spectrales	0,5-0,6 μm	0,45-0,52 μm		0,45-0,52 μm	0,433-0,453 μm
	0,6-0,7 μm	0,52-0,6 μm		0,53-0,61 μm	0,45-0,515 μm
	0,7-0,8 μm	0,63-0,69 μm	-	0,63-0,69 μm	0,525-0,6 μm
	0,8-1,1 μm	0,76-0,9 μm		0,78-0,9 μm	0,63-0,68 μm
		1,55-1,75 μm		1,55-1,75 μm	0,845-0,885 μm
		2,08-2,35 μm		2,09-2,35 μm	1,56-1,66 μm
					1,36-1,39 μm
					2,1-2,3 μm
Infrarouge thermique	-	10,4-12,5 μm	-	10,4-12,5 μm	10,3-11,3 μm 11,5-12,5 μm
Panchromatique	-	-	-	0,52-0,9 μm	0,5-0,68 μm
Résolution	Générale : 79 m	Générale : 30 m Infrarouge thermique : 120 m	-	Générale : 30 m Panchromatique : 15 m Infrarouge thermique : 100 m	Générale : 30 m Panchromatique : 15 m Infrarouge thermique : 60 m

Source : Centre Canadien de Télédétection, <http://cct.rncan.gc.ca/>

Le tableau 1 décrit les principales caractéristiques du satellite Landsat de sa création à nos jours (de landsat1 à 8).

1.1.1. Mesures d'infiltrométrie

Les tests d'infiltrométrie sont révélateurs de l'indice physique de l'état du sol (Fadiala et al 1996). De nombreuses mesures ont été effectuées afin de maîtriser la forte variabilité des états de surface du sol. Des coordonnées ont été projetées sur la carte des sols (PIRT), ainsi pour chaque type de sol, trois points ont été pris soit 15 points au total. La méthode a consisté à mesurer le taux d'infiltration pendant un certain temps (c'est-à-dire le volume d'eau infiltré par minute). Une méthode simple à appliquer a été choisie. Les infiltromètres retenus sont constitués d'un cylindre en tube PVC de 20 cm de diamètre pour une hauteur de 15 à 20 cm. Les sections sont biseautées en fin de faciliter la pénétration dans le sol. Ces cylindres sont enfoncés manuellement sur une profondeur de 2 à 3 cm. Après la mise en place une quantité constante d'un litre d'eau a été versée dans le cylindre. Le chronomètre est alors démarré, la mesure de la hauteur d'eau est faite à l'aide d'une règle de 30 cm, toutes conditions étant égales par ailleurs (température, etc.), le temps nécessaire à son infiltration. Après plusieurs essais, un litre d'eau a été retenue comme quantité à verser dans le type. Sur chaque type de sols 9 essais ont été réalisés, soit 3 essais par point. Ainsi la moyenne des trois essais représente le temps d'infiltration du point. (cf. photo 1).



(1ère étape)



(2ème étape)



(3^{ème} étape)

Photo 1 : Les différentes phases des mesures d'infiltrométrie

(4^{ème} étape)

1.2.4. Suivi de l'étendue d'eau de la mare.

Pour Suivi de l'étendue d'eau de la mare, nous avons eu recours à un certain nombre de matériels techniques définis comme suit :

- ✓ Un GPS modèle Garmin pour le géoréférencement ;
- ✓ Les fiches de relevés pour noter les données collectées ;
- ✓ Une pirogue ;
- ✓ Un appareil photo pour illustrer les activités sur le terrain ;
- ✓ Une règle graduée pour la profondeur de la mare
- ✓ Quatre tubes PVC pour les mesures de l'infiltration
- ✓ Une planche : elle a servi pour l'enfoncement du tube PVC dans le sol.
- ✓ Trois règles de 30 cm : Utilisées pour mesurer la hauteur d'eau
- ✓ Trois bidons de 40 litre : Les bidons ont servi de réservoir d'eau pour les mesures d'infiltration
- ✓ Deux Gourdins en bois : Utilisés pour la fixation des tubes PVC
- ✓ Un chronomètre : pour déterminer le temps de l'infiltration de l'eau
- ✓ Une carte topographique : La carte topographique étant la base pour les autres cartes thématiques, celle couvrant notre zone d'étude (Hombori ND-30-XXIII, 1/200 000 de 1954 de l'IGM) a été utilisée. Elle décrit la géomorphologie du relief et favorise tous éventuels travaux.
- ✓ Carte du sol PIRT du mali :

La carte des unités sol PIRT du mali 1/500 000 (1986) a été utilisée pour extraire les unités de la zone d'étude et caractériser les différents types de sol. Elle a également servi de carte de base pour les mesures d'infiltration.

- ✓ Un MNT global de 30 m de résolution produit à partir des données ASTER (Abrams et al. 2010) a été utilisé pour générer le bassin versant et ses HRU.

1.2.5. Changement de typologie des sols selon la faciès horizontale (changement des états de surface).

La carte PIRT 1/500 000 a été utilisée comme carte de référence sur laquelle les coordonnées géographiques ont été placées. Les relevés terrain ont permis de caractériser chaque type de sol et cerner au final la physionomie actuelle de ces différents sols.

1.2.6. Facteurs de pérennisation de la mare d'Agoufou

Pour pouvoir appréhender les facteurs de pérennisation de la mare, une approche a été menée. L'approche étudie des ressources naturelles du bassin couplées aux impacts des changements climatiques et aux effets anthropiques.

1.2.7. L'évolution de la surface de la mare d'Agoufou

Pour mieux cerner l'évolution de la mare d'Agoufou, les images d'archives du Satellite Landsat ont été téléchargées, traitées et interprétées. La classification supervisée a été utilisée. Les relevés terrain ont permis de valider les résultats et de prendre seulement la couche eau par image pour la dynamique.

2. RESULTATS ET DISCUSSIONS

2.1. Résultats

Les principaux résultats ont porté sur les mesures d'infiltrométrie, le suivi de l'étendue d'eau de la mare, le changement des états de surface, les facteurs de pérennisation de la mare d'Agoufou et l'évolution de la surface de la mare d'Agoufou.

2.1.1. Mesures de l'infiltration

L'infiltrométrie a permis de comprendre le processus d'alimentation et de pérennisation de la mare d'Agoufou dans le temps et dans l'espace.

Tableau 2 : Résultat obtenu de l'infiltration des différentes unités sol en cm/h

Unités sol	Taux d'infiltration en (cm/h)
Terrain cuirassé	60,33
Dunes stabilisées	74,12
Dunes aplanies	61,22
Sol inconnu	12,67
Plaine limoneuse	116,50

Les analyses révèlent que le temps d'infiltration change en fonction des unités sols. Ainsi les sols inconnus qui sont aujourd'hui des regs ont le taux d'infiltration le plus bas soit 12,67 cm/h. Cela s'explique par le caractère très moins imperméable des éléments de ces unités sols. Donc les quantités de pluie, qu'elles soient petites ou grande sont directement ruisselées vers la mare. Ce ruissellement également est rendu facile dû à la topographie du terrain, une pente inclinée vers la mare et la rareté des arbres et du tapis herbacé. Il est suivi des terrains cuirassés avec 60,33cm/h. Cela s'explique par la physionomie de cette unité qui est au jour d'aujourd'hui recouvert de sables et du limon en surface. Les dunes aplanies viennent en troisième position avec 61,22 cm/h, quant aux dunes stabilisées elles occupent 74,12 et en fin les plaines limoneuses avec 116,50. Les taux qui dépassent les 60 cm/h sont considérés plus rapides, cela est dû à la texture du sol c'est-à-dire plus de présence de limon et de sables fins en surface.

Tableau 3 : Caractérisation des points d'infiltration

Tube	Hauteur Tube pvc	Diamètre Tube pvc	Quantité d'eau/l	Hauteur d'eau En cm	Temps	Distance à la mare	Longitude	Latitude	Type de sol	Végétation	Espèces dominantes
A	30	10	1	12	9mm 11s	2,30k m	1,4683 7	15,34 63	Sol sableux	Savane arbustive	<u>Leptadenia pyrotechnica</u>
B	30	10	1	12	17mm3 3s	2,30k m	1,4683 7	15,34 63			
C	30	10	1	12	11mm2 8s	2,30k m	1,4683 7	15,34 63			

Ce tableau informe sur la description de chaque point mesuré, il fait ressortir l'annotation du tube, la hauteur, le diamètre, la quantité d'eau déversée, le temps enregistré, la distance du point à la mare, les coordonnées géographiques, le type de sol, la végétation et enfin les espèces dominantes.

2.1.2. Changement de typologie des sols selon le faciès horizontal (changement des états de surface).

Les relevés terrain montrent de 1986 à 2018 soit 32 ans que ces unités sols ont connues d'énormes changements qui sont les conséquences des facteurs climatiques (vent, érosion éolien et hydrique etc.). cf carte 2.

Aujourd'hui les réalités terrains donnent quatre types de sols qui sont entre autres :

✓ Sols cuirassés dénudés ou Regs:

Les unités gravillonnaires et les dunes aplanies (da2) ont perdu leur morphologie d'antan.

Ce sont aujourd'hui des sols cuirassés dénudés caractérisés par une savane arbustive éparse dominée par quelque pied d'épineux. Ils occupent le nord du bassin avec une superficie de 9735,23 ha soit 35,86% de la superficie totale. Ils sont bien drainés et en surface le sol a une couleur blanc et rougeâtre qui favorise les écoulements latéraux selon la pente vers la mare. Les quantités de pluies tombées sont généralement drainées vers la mare. La présence de pâturage herbacé est éparse et temporaire.

✓ Dunes (dépôt éolien)

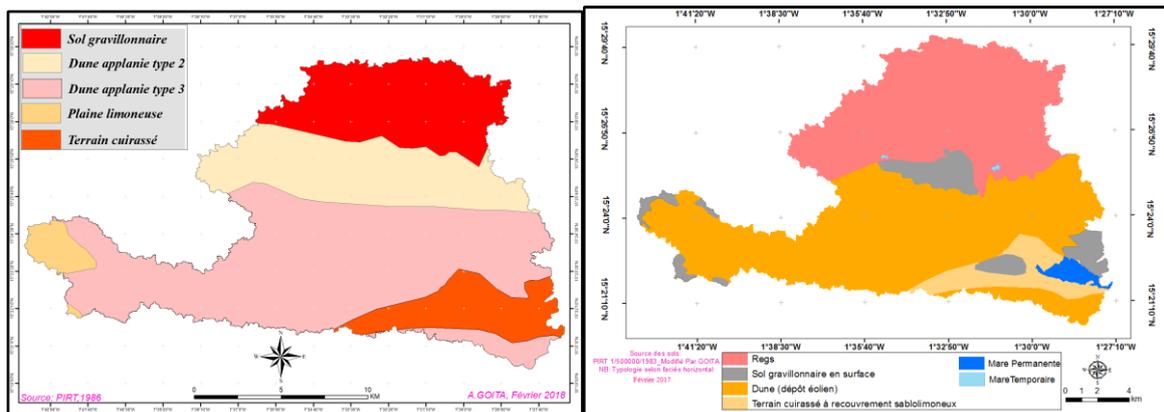
Les dunes jadis stabilisées ont connu une augmentation de volume de dépôt dus plutôt au vent. Elles sont localisées au centre et à l'extrême sud du bassin avec une superficie de 13 334,78 ha soit 49,11% de la superficie totale du bassin. Caractérisé par une savane arbustive dégradée dominée par leptadenia pyrotechnica et acacia raddiana. Elle sert au pâturage et la culture du mil, surtout aux abords des chenaux d'alimentations de la mare.

✓ Sols Gravillonnaires

Localisé de part et d'autre du bassin occupant de petites surfaces, ils ont une superficie de 2 042,85 soit 7,52%. Des plaines limoneuses tantôt allant des dunes stabilisées jadis sont aujourd'hui transformés en gravillon totalement nu en surface.

✓ **Terrain cuirassé à recouvrement sablo-limoneux**

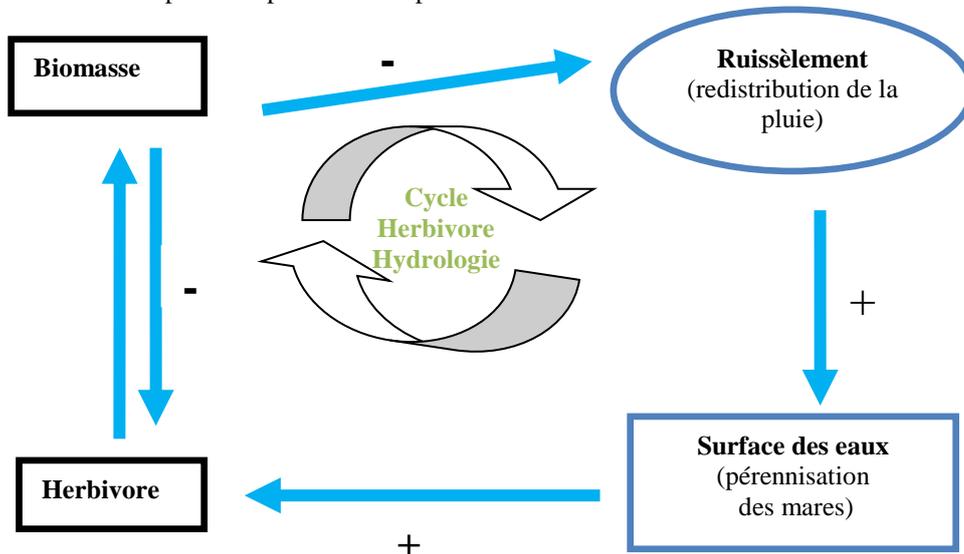
Localisé sud du bassin avec une superficie de 2034,87 ha soit 7,49 % étaient jadis des terrains cuirassés à affleurement rocheux proprement dit. Par les facteurs climatiques ils sont couverts de sables et de limons en surface. La végétation est dominée par une savane arbustive dense aux abords de la mare dans les chenaux d'alimentations de la dite mare. Les espèces dominantes sont : *Acacia raddiana*, *Balanites aegyptiaca*, *Acacia nilotica*, *Ziziphus mauritiana*, *Acacia ehrebergiana* et *leptadenia hastata*. Il est pâturé et connaît la culture de beaucoup de spéculations (mil, sésame, pastèque etc.).



Carte 2 : Carte des sols PIRT 1986 1/500 000 modifiée par GOITA selon le faciès horizontal.

2.1.3. Facteurs de pérennisation de la mare d'Agoufou

Dans les années 1974 et 1984, sous l'effet de la sécheresse la végétation ligneuse et herbacée a connu une grande réduction voire une disparition dans le sahel. Avec ses corollaires comme l'installation et l'accroissement du ruissèlement éolien et hydrique. Cet état de fait a amené un changement d'état de surface des sols du bassin. Et cela favorisa à chaque pluie les écoulements latéraux selon la pente vers les basses zones du bassin (exécutoire). La présence massive du cheptel dans le bassin dans toute période de l'année est un facteur de dégradation des ressources herbacées qui favorisent les écoulements. En 1984, subitement les mares ont changé d'état, c'est-à-dire de temporaire à pérenne en dépassant la situation normale.



(Hanan & Lehmann, 2011, adapté)

Figure 2 : Schéma explicatif du cycle herbivore hydrologie

Ce schéma fait ressortir l'effet de la biomasse et des herbivores sur la connectivité de la mare et la durabilité de son eau dans le sahel suite aux effets du changement climatique. Ce cycle prend départ par les herbivores qui viennent chercher la biomasse, ils jouent un effet négatif sur la biomasse et également positif, parce que les bouses laissées favorisent le développement de la biomasse. Les herbivores mangent et piétinent les plantes qui

réduisent de tailles. Cette réduction de la taille des plantes va favoriser le ruissellement et une redistribution de la pluie en période hivernale, donc un effet négatif. Le ruissèlement va influencer sur les eaux de surfaces (mares) notamment leur étendue et leur pérennisation, donc un effet positif. Et la disponibilité de l'eau en permanence va favoriser l'arrivé en nombre des herbivores donc un effet positif et le cycle est fermé.

2.1.4. L'évolution de la surface de la mare d'Agoufou

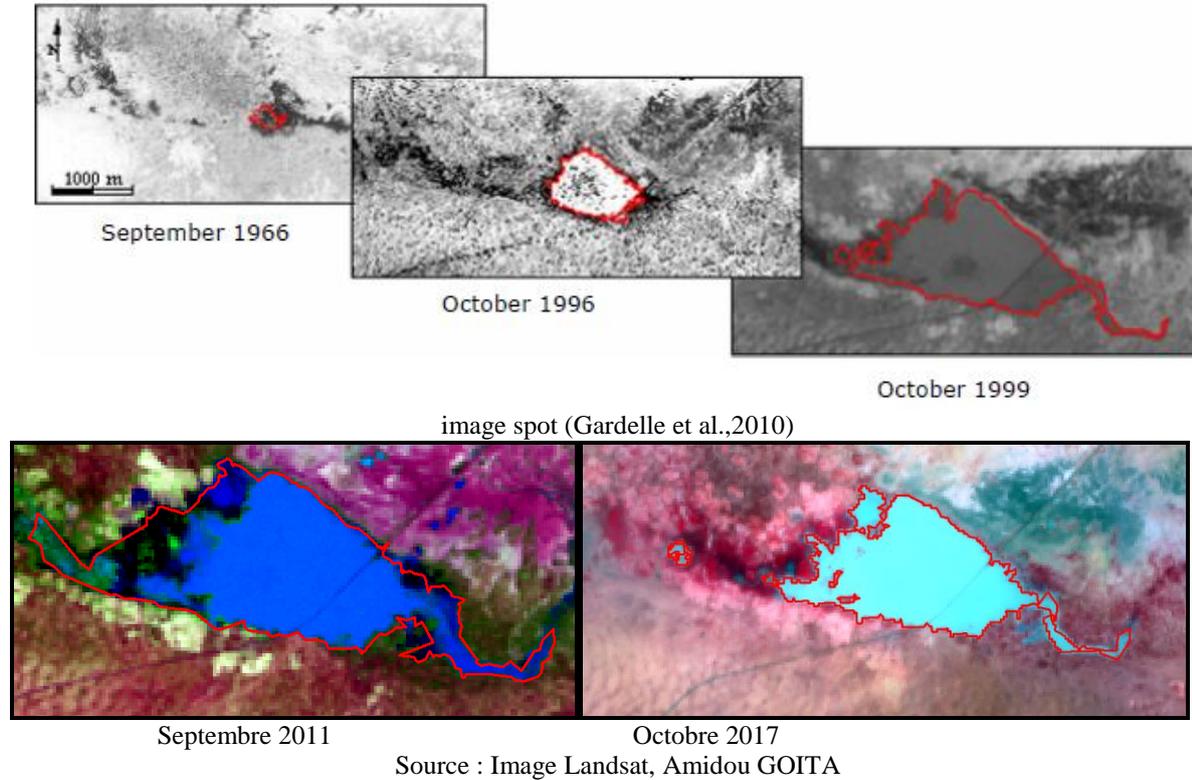


Figure 3 : Augmentation de la surface de la mare d'Agoufou de 1966 à 2017

La mare d'Agoufou dans les années 1966 était temporaire ne dépassant les 50 ha en 1999 elle a dépassée les 300 ha, et de 1999 à 2017 elle a atteint le seuil de 370 ha

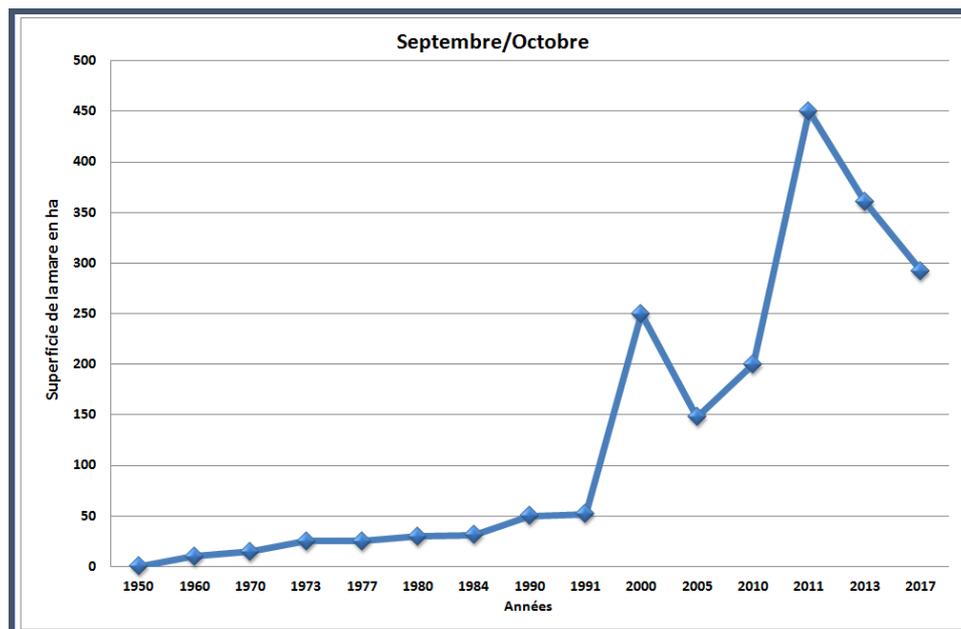


Figure 4: Evolution de la superficie en eau de la mare d'Agoufou de 1950 à 2017 en Septembre/octobre des images Landsat (1970-2017) et photo corona (1950 et 1960) Source : Amidou Goïta

2.1.5. Suivi de l'étendue d'eau de la mare

La superficie de la mare est délimitée à l'aide d'un GPS garmin en faisant le pourtour complet. Il a été observé une diminution de son étendue à chaque sortie de terrain due à l'évapotranspiration, l'arrêt du processus d'alimentation, l'abreuvement des animaux et l'utilisation de l'eau par les communautés. La superficie de la mare est passée de 280, 115 ha en octobre 2016 à 50, 586 ha en avril 2017 soit une régression de 229,529 ha en sept (7) mois. Dans le cadre du présent travail, à chaque sortie de terrain, il a été observé une diminution de l'étendue de la mare ou d'eau de surface disponible. Cette réduction est due à l'arrêt du processus d'alimentation en fin de saison pluvieuse, à l'évaporation, à l'abreuvement des animaux et à l'utilisation de l'eau par les communautés. En effet, la vitesse de réduction de la superficie de la mare est très importante, elle a régressé de plus de 80 % en 7 mois.

2.2. DISCUSIONS

La discussion a porté essentiellement sur l'étude écohydrologique, le suivi de l'étendue d'eau de la mare, le changement des états de surface, les facteurs de pérennisation de la mare d'Agoufou et l'évolution de la surface de la mare d'Agoufou.

2.1.1. Changement de typologie des sols selon le faciès horizontal (changement des états de surface).

Des résultats similaires ont été rapportés par Laurent Kergoat et al.2010, dans un livrable sur le suivi des mares du Gourma Malien le changement d'état de surface et l'augmentation du ruissellement.

Le premier aspect intéressant est celui des "surfaces sableuses" de 1954 qui sont devenues des "affleurements" en 2017. Cet état de fait explique à la fois la diminution des surfaces sableuses et une large part de l'augmentation des surfaces d'affleurement (regs). Il traduit une érosion importante sur les pentes, même douces. On note que d'autres classes contribuent légèrement à l'augmentation des affleurements.

Le deuxième aspect est que les bas-fonds aux sols argilo-limoneux ont quasi disparus, laissant la place à des affleurements, du limon décapé, ou du sable (Descroix et al., 2009, Descroix et al., 2012, Gardelle et al., 2010, Diarra et al 2011, Goita A.2014).

L'évolution des types de surface (2007 versus 1954) et les transitions entre ces types indiquent une forte érosion sur l'ensemble du bassin et une modification importante des écosystèmes. En effet, les surfaces sableuses sont propices à la croissance des herbacées annuelles, accompagnées de quelques arbres épars, les bas-fond argilo-limoneux abritent, ou abritaient, la plupart des arbres du bassins, ainsi qu'un couvert herbacé, alors que les surfaces de limon décapé et les affleurements ne permettent aucune installation de la végétation. La concentration du ruissellement dans un réseau de ravines marquées est également un facteur défavorable au maintien d'un couvert végétal important.

2.1.2. Ecohydrologie

La pluviométrie est le premier moteur de la production végétale au sahel (Penning Vries et Djitéye, 1982). L'anomalie de la pluviométrie a montré que les eaux de surface ont très fortement augmenté dans le Gourma au cours des 50 dernières années en générale et dans le bassin en particulier (Kergoat et al 2010). Cette dynamique, amorcée dès 1984, prend toute son ampleur dans les années 1990. Le fait frappant est que cette évolution n'est pas corrélée au cumul annuel de précipitation, illustré pour la station de Hombori sur la figure 5.

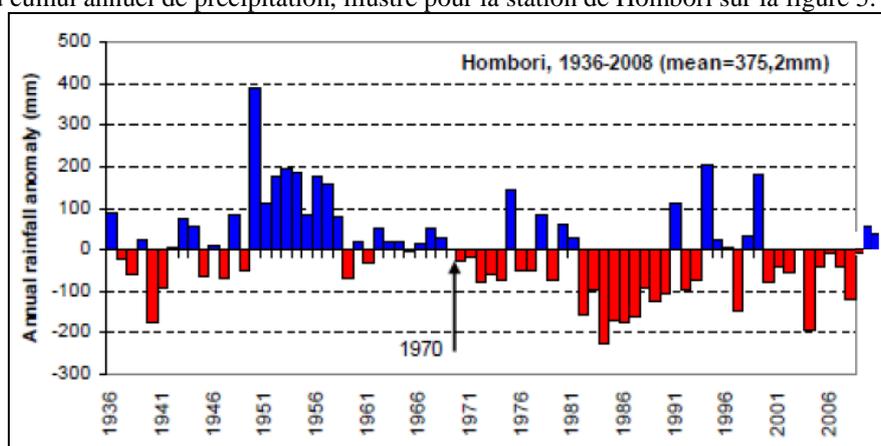


Figure 5: Tirée de Laurent Kergoat et al 2010, Anomalie de précipitation annuelle à Hombori 1936-2008, complétée jusqu'en 2011. Source : DNM MALI. NB : La Station d'Hombori n'est plus opérationnelle depuis 2012.

Des résultats similaires ont été rapportés par (Albergel 1987, voir aussi Favreau et al. 2009, Laurent Kergoat et al, 2010, Amogu et al. 2010, Sighommou et al 2013, Mahé et al 2013, Goita A. 2014 pour une synthèse du 'paradoxe Sahélien'), Paradoxalement, les surfaces en eau ont augmenté à la suite des grandes sécheresses des années 70-80, puis ont continué à augmenter pendant deux décennies globalement déficitaires (1990-2008). Gardelle et al 2010, Albergel 1987, Favreau et al. 2009, Amogu et al. 2010, Sighommou et al 2013, Mahé et al 2013 ont passé en revue les facteurs susceptibles d'entraîner un tel phénomène. Nous retenons le changement d'occupation du sol, l'augmentation du ruissellement de surface essentiellement comme cause première. Une déclinaison du 'paradoxe' Sahélien, en milieu non-cultivé. L'augmentation du ruissellement de surface a été observée depuis les sécheresses Sahéliennes extrêmes des années 70 et début 80 sous différentes formes, et à différents endroits le plus souvent en milieu sud sahélien, ou en Sahel cultivé dans le Gourma, mais aussi dans le Hodh mauritanien et de la région de Zinder au Niger. La sécheresse elle-même est parfois citée comme cause de ce phénomène, mais le plus souvent, c'est le changement d'usage des sols qui est le facteur causal avancé, et plus précisément la mise en culture et le changement des états de surface.

2.2.1. L'évolution de la surface de la mare d'Agoufou

L'augmentation des eaux de surface (les mares) dans le sahel et le passage d'un état éphémère à pérenne, contrairement à une réduction drastique de la pluviométrie d'où le 'paradoxe sahélien s'explique par le cycle. On rejoint les autres auteurs (Gardelle et al., 2010, Hanan & Lehmann, 2011, Mikkels P. Warm, 2013) qui ont aussi convergé dans le même sens. Il est important de rappeler qu'au Sahel, l'évolution temporelle de la pluviométrie et des ressources en eau n'est pas toujours corrélée (e.g. Mahé et al., 2005 ; Gerbaux et al., 2009, Kaptué, 2010) On pense que ce processus connu sous le nom de 'paradoxe sahélien' s'explique aujourd'hui par les changements liés à l'utilisation et à l'occupation des sols ce qui nous à pousser d'explorer les liens entre la dynamique des mares de la région et le climat, la végétation, l'utilisation des terres, la topographie et l'hydrologie à l'échelle du bassin versant. Pour expliquer les changements hydrologiques observés dans le Sahel on trouve que la végétation et le pâturage interagissent dans les bassins versants semi-arides pour contrôler la dynamique des eaux de surface (eaux de ruissellement dans les mares). L'augmentation du volume de la mare prolonge la durée de pâturage pour le bétail (et la faune qui dépend de l'eau). Les mares qui restent après la saison sèche peuvent déclencher la réorganisation socio-économique plus significative (sédentarisation).

2.2.2. Facteurs de pérennisation de la mare d'Agoufou

Les résultats similaires ont été rapportés par Laurant Kergoat et al., 2010, Kaptué, 2010, Hanan & Lehmann, 2011. Au cours d'une sécheresse extrême, la végétation herbacée ne s'est pas développée. Quant au ligneux, les quelques espèces qui ont résisté ont été dessouchées par le ruissèlement éolien et hydrique témoignent les arbres morts dans la zone nord du bassin (Annaka). La disponibilité de l'eau en permanence a favorisé l'arrivée en nombre des herbivores qui viennent chercher la biomasse dans le bassin, ils jouent un effet négatif sur la biomasse et également positif, parce que les bouses laissées favorisent le développement de la biomasse. Les herbivores mangent et piétinent les plantes qui réduisent de tailles. Cette réduction de la taille des plantes va favoriser le ruissellement et une redistribution de la pluie en période hivernale, donc un effet négatif. Le ruissèlement va influencer sur les eaux de surfaces (mares) notamment leur étendue et leur pérennisation, donc un effet positif. Le ruissellement, pendant la saison des pluies, est accéléré. Normalement, ce ruissellement est plus important en début de saison des pluies, avant la croissance des herbacées (Dubreuil 1972).

Conclusion :

Au terme de ce travail on peut retenir que l'analyse des images satellite montre que la mare est devenue pérenne en 1991 et sa surface ne cesse de s'agrandir d'année en année.

L'apparition de nouvelles mares et l'augmentation de leur superficie dans le Sahel avec un passage de l'état temporelle à un état pérenne a franchi un seuil critique pour certaines mares.

Le phénomène d'augmentation des surfaces des mares Sahélienne est répandu de la Mauritanie au Niger, dans des régions qui possèdent des caractéristiques communes. Les mares sont essentiellement alimentées par le ruissellement sur des sols peu profonds, qui ne couvrent pas forcément une surface relative très importante, mais sur lesquels le ruissellement est très fort et l'utilisation agricole des terres est limitée. Le paradoxe Sahélien se décline donc en Sahel peu cultivé. La mare d'Agoufou est condamnée à rester pérenne dans le temps, sauf en cas de bouleversement écoclimatique chose qu'on ne souhaite jamais. Le bassin versant de la mare d'Agoufou représente un ensemble écologique important pour la biodiversité au niveau du sahel en général et du gourma malien en particulier selon les fonctions écologiques d'un bassin versant: régulation des régimes hydriques, des cycles biogéochimiques.

En perspectives, il serait intéressant de continuer cette étude sur le long terme tout en diversifiant le champ de recherche du point de vue de la pluviométrie, ruissellement, sol. La mare étant totalement exposée aux différentes agressions, des techniques de sa protection méritent d'être entreprises, et cela à travers des plantations des arbres tout autour d'elle. La valorisation de cette eau doit être initiée à travers à travers des activités socioéconomiques de développement.

BIBLIOGRAPHIE

1. **Albergel, J.** 1987, Sécheresse, désertification et ressources en eau de surface — Application aux petits bassins du Burkina Faso,
2. **Amogu, O. , Descroix, L., Yéro, K.S., Le Breton, E., Mamadou, I., Ali, A., et al.** 2010. Increasing river flows in the Sahel? *Water 2* : 170-99.
3. **Ambroise, B.** 1998, La dynamique du cycle de l'eau dans un bassin versant : Processus, Facteurs, Modèles. 206p. Bucarest
4. **Calas, A.**, 2012: Suivi des mares du Hodh (Mauritanie) par télédétection spatiale; mémoire de master.
5. **F. Baup, E., Ceschia, V., Demarez, P., De Rosnay, L. Kergoat, F. Lavenu, V. Le Dantec, P. Hiernaux, S. Mangiarotti, B. Mougnot, E. Mougin, O. Samain, F. Timouk.** Approche Multi-Echelle du Fonctionnement et de la Dynamique des Surfaces Sahéliennes, article post doct 24 p (AMMA)
6. **Frappart, F., Hiernaux, P., Guichard, F., Mougin, E., Kergoat, L., Arjounin, M., Lavenu, F., Koité, M., Paturel, J.- E., and Lebel, T.,** 2009. Rainfall regime across the Sahel band in the Gourma region, Mali, *J. Hydrol.*, 375(1–2), 128–142
7. **Goïta A.,** 2013. **Effet du changement climatique sur la dynamique des ressources naturelles dans le Gourma Malien : cas du bassin de la mare d'Agoufou. Mémoire de DEA « Gestion des Zones Humides et Développement Durable », ISFRA. Bamako, 91p.**
8. **Ibrahim, B. M., Descroix, L., Boubkraoui, S., Mamadou. I., Alzouma. I., Le Breton, E., Amogueleth, O.,** 2005 Changements d'usage des sols et modifications du cycle de l'eau au Sahel, AMMA, 24 p
9. **J. Gardelle, P. Hiernaux, L. Kergoat, and M. Grippa,** 2010 Less rain, more water in ponds: a remote sensing study of the dynamics of surface waters from 1950 to present in pastoral Sahel (Gourma region, Mali), , 16p , Centre d'Etudes Spatiales de la Biosphere (CESBIO), Toulouse (France).
10. **Valentin, C, Janeau, J.L.** Cartographie des états de surface de trois bassins versants du Mali : Tin Adjar, Koumbaka et Dounging, ORSTOM, Cote d'ivoire 1988, 16 p