



SUIVI PAR IMAGERIE SATELLITALE DE LA DYNAMIQUE DES BERGES DU LOGONE, ENTRE LA RETENUE DE MAGA ET LE LAC TCHAD

AN APPRAISAL OF THE LOGONE BANK DYNAMICS BETWEEN MAGA DAM AND LAKE CHAD, USING SATELLITE IMAGERY

KANA COLLINS ETIENNE

Institut National de Cartographie du Cameroun, BP 157- Yaoundé

ckana71@yahoo.fr

RESUME

Cours d'eau endoréique contribuant à plus de 90% aux apports d'eau du Lac Tchad et frontière naturelle entre le Cameroun et Tchad, le système du Logone-Chari a été souvent étudié sous l'angle des variabilités du régime hydrologique et des risques d'inondations de la plaine voisine. L'évolution des berges, qui comporte des enjeux socio-économiques et stratégiques importants, est restée jusque-là peu documenté. L'objectif visé par cette étude est de contribuer à l'évaluation et à la caractérisation de la dynamique des berges orientales, partie du territoire camerounais. La méthodologie combine la discrétisation de la bande active sur des images Landsat multi chronique, des observations et enquêtes de terrain, et l'analyse des données dans un SIG

Les résultats indiquent que les avancées et recul se succèdent au fil du temps, au gré des variations des paramètres hydrologiques et de la diversité du matériau alluvial. En 30 ans, les variations oscillent entre -200 (recul des berges) et 171 mètres (avancée des berges) dans la section du Chari au Nord de Kousséri, contre -121 et 125 mètres dans la section du Logone au Sud. Pour la même période, on note un gain territorial de près de 853,32 ha, représentant l'écart entre les engraisements (1 397,1 ha) et les reculs (543,78 ha). Cette évolution n'est cependant pas linéaire. Elle se fait par à-coups, au cours des cycles saisonniers, suivant des processus interrompus par des rétroactions négatives. Les secteurs sinueux ou en tresses sont les plus exposés.

Même si le phénomène d'érosion des berges est indispensable pour dissiper l'énergie des eaux, des mesures de protection doivent être envisagés là où la

sécurité des biens et des personnes est menacée. L'aménagement intégré de la plaine alluviale du Logone doit prendre en compte la nécessité préserver un espace minimal de liberté autour des berges, pour permettre à l'eau de conserver son potentiel d'ajustement latéral et longitudinal.

Mots clés : Imagerie satellite, dynamique des berges, Logone, aménagement

ABSTRACT

Endorheic watercourse which contributes more than 90% to water supplies of Lake Chad, and natural border between Cameroon and Chad, the Logone-Chari system, has often been studied in terms of variability of the hydrological regime and of the risks associated with floods in the neighboring plain. The evolution of the river banks, which involves important socio-economic and strategic stakes, has until now been little documented. The objective of this study is to contribute to the assessment and characterization of the dynamics of the eastern banks, part of the Cameroonian territory. The methodology combines discretization of the active band on multi-chronic Landsat images, field observations and surveys, and analysis of data in a GIS.

The results indicate that advances and setbacks follow one another over time, due to variations in hydrological parameters and the diversity of the alluvial material. In 30 years, variations range between -200 (decline of the banks) and 171 meters (fattening of the banks) in the section of the Chari in the north of Kousseri, against -121 and 125 meters in the section of Logone in the South. For the same period, there is a territorial gain of almost 853.32 ha, representing the differential between fattening (1,397.1 ha) and decline (543.78 ha). However, this evolution is not linear. It is done in jerks, during the seasonal cycles, following processes interrupted by negative feedbacks. The sinuous or braided areas are the most exposed.

Although shoreline erosion is essential to dissipate the energy of water, protective measures should be considered where the safety of property and persons is threatened. The integrated management of the Logone plain should take into account the necessity to preserve a minimal space of freedom around the banks, in order to allow the water to retain its potential for lateral and longitudinal adjustment.

Key words: Satellite imagery, river dynamics, Logone, adjusting

INTRODUCTION

Les berges de cours d'eau constituent en général des milieux à l'interface des écosystèmes aquatiques et terrestres, qui fournissent des services écologiques importants : corridor écologique, filtration des eaux, zone de récréation et d'activités pour les populations. Celles du Logone présentent un intérêt stratégique tout particulier, dans la mesure où elles constituent la ligne frontière entre deux états de l'Afrique Centrale : le Cameroun et le Tchad. Dans cette zone soudano-sahélienne, confrontée au phénomène de désertification (dégradation des terres par suite de divers facteurs parmi lesquels les variations climatiques et les activités humaines), la présence du Logone est une précieuse source de vie. En effet, ce cours d'eau entretient sur son rivage une relative fraîcheur qui y a favorisé l'installation des principaux centres urbains (N'djamena, Kousseri, Goulfey, Logone- Birni, Blangoua), ainsi que d'autres nombreuses localités rurales où la population vit principalement de la pêche et de l'agriculture. En outre, le développement de la riziculture irriguée est tributaire des eaux du Logone, pompées dans les canaux d'irrigation à partir des stations de pompage et les retenues aménagées telles que Maga.

C'est dans cet espace aux enjeux multiples que l'érosion des berges apparaît désormais comme un processus géomorphologique susceptible d'altérer les biens, et la configuration de la ligne frontalière. Les berges sont définies ici comme la zone de séparation entre le milieu aquatique et le milieu terrestre (Verniers, 1995). Elles sont composées :

- 1) du pied de talus qui est la zone située sous le niveau moyen des eaux, généralement soumise à l'action quasi-permanente du courant ;
- 2) et du talus qui domine et encadre le lit mineur

L'objectif de cette contribution est l'évaluer, au moyen de l'imagerie satellite, l'ampleur de la dynamique des berges du Logone. La partie étudiée comprend 2 tronçons, d'égale longueur (221 km), aux caractéristiques hydrologiques différentes : le premier est constitué du Logone, entre la retenue de Maga et Kousseri ; le deuxième naît de la confluence entre le Logone et le Chari, et court de Kousseri- N'djamena au Lac Tchad. Un tel choix permet de vérifier l'hypothèse selon laquelle les caractéristiques hydromorphologiques les écoulements seraient le déterminant essentiel de l'ampleur de l'érosion des berges.

PRESENTATION DE LA ZONE D'ETUDE

Le *Logone*, dans la partie sud ou *Chari* au nord de Kousseri, tributaire du Lac Tchad, constitue le principal cours d'eau permanent qui arrose cette zone frontalière de l'Afrique centrale, soumise aux influences soudano-sahéliennes. La géomorphologie régionale s'inscrit dans la cuvette tchadienne caractérisée par une grande uniformité du relief, à peine interrompue par quelques buttes et cordons sableux. Les altitudes varient peu, entre 312 mètres sur la digue de Maga et 280 mètres aux confins du Lac Tchad (Olivry, 1986 ; HAECON/BIRD/PNUD, 1988 ; Lienou et al, 2003). Le fleuve est globalement orienté Sud-Nord, n'incise pas véritablement les terrains traversés. Les bourrelets de berges, discontinus, issus de la dynamique propre des eaux ou d'un endiguement anthropique, sont peu élevés : partout inférieurs à 7 mètres de hauteur (Doudje, Tchindjang & Moupeng, 2014). Leur rupture s'illustre par des indentations déprimées servant de défluent qui piègent l'eau des crues et participent à l'enneigement des plaines voisines (Olivry, 1986; Naah, 1990).

La zone est soumise au climat tropical de type soudano-sahélien, avec deux saisons d'inégale longueur :

- La saison de pluies qui dure entre 4 et 5 mois à partir de juin, génère entre 450 mm de pluies à Zina au sud, et 300 mm vers le Lac Tchad ;
- La grande et rude saison sèche, pendant lesquelles les fortes températures (34°C en moyenne) s'associent aux brumes sèches pour créer une ambiance générale d'inconfort climatique.

Le Logone est une précieuse source de vie, semblable à ce qu'est le Nil pour l'Egypte. Ses berges attirèrent dès le XVII^e siècle les populations Musgum, Kotoko, Massa et Moussey installés sur des microbuttes et pratiquant la pêche comme activité principale (Seignobos & Iyebi-Mandjek, 2000). Le commerce transsaharien favorise l'ouverture de comptoirs qui deviendront plus tard les villes coloniales de Fort Lamy (actuelle N'djamena) et Fort Fourreau (actuelle Kousseri). La création de nouvelles unités administratives, et l'activité commerciale florissante autour de poisson, du riz et du bétail favorisent l'essor de nouveaux centres urbains (Goulfey, Blangoua, Logone- Birni, Maga) sur les berges du Logone (Fig. 1). La transhumance de saison sèche vers les prairies encore humides des *yaéré* et des abords du Lac Tchad attirent les éleveurs de plusieurs nationalités (Tchadiens, Nigériens, et même soudaniens), à la faveur des Accords scellés dans le cadre de la CBLT (Commission du Bassin du Lac Tchad). La récurrence des années sèches depuis les années 70 souligne la fragilité écologique de cet environnement (Billon et al, 1974 ; Olivry, 1974,

Chouret, 1975 ; Lienou et al, 2003). Face à la première alerte en 1972, l'Etat réagit par l'aide d'urgence et par des aménagements hydro-agricoles destinés principalement à la culture du riz ((Roupsard, 2000). La problématique de l'eau est en somme omniprésente, soit en termes de manque pendant des années à pluviométrie déficitaire, soit en termes d'excès dû aux crues du Logone, ou à la forte concentration, dans le temps, des épisodes pluvieux (BCEOM, 1964 ; Kana et al, 2014). Au-delà des mesures d'adaptation mises en œuvre, les processus biologiques et socioéconomiques sont plus ou moins calés sur le cycle de l'eau. La dynamique des berges font partie de ces processus engendrés par les conditions hydrologiques.

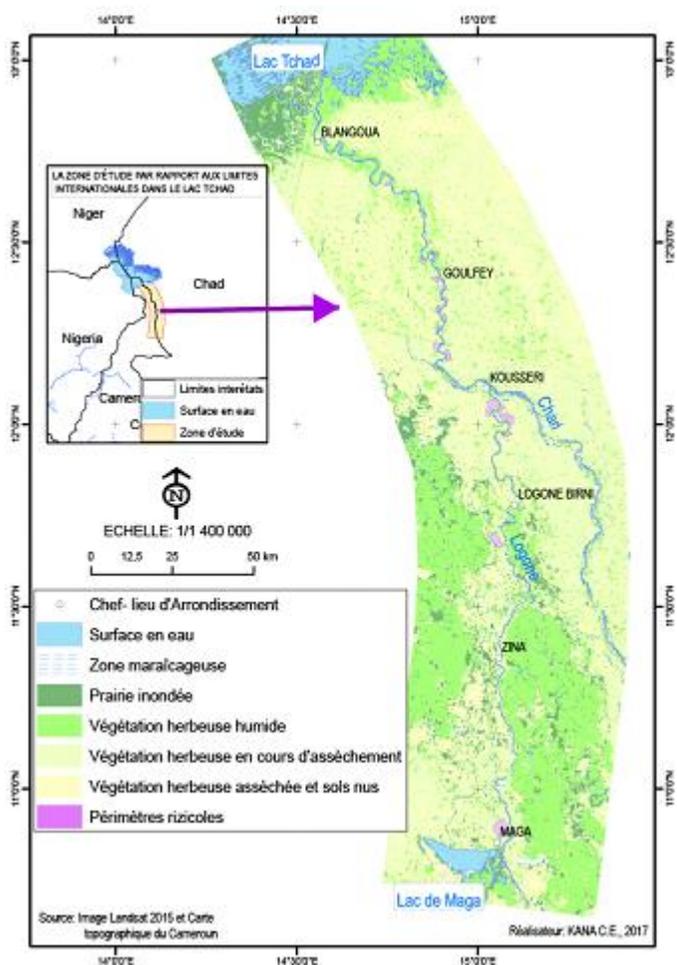


Figure 1 : Occupation du sol de la zone d'étude

METHODOLOGIE

La méthodologie de l'étude combine les enquêtes de terrain et le traitement d'images satellite. Une première enquête exploratoire a eu lieu en mars 2013, et a permis de diagnostiquer dans un certain nombre de secteurs sensibles, parmi lesquels le marché de Blangoua. Elle a aussi donné lieu à quelques entretiens avec les populations riveraines, sur les déterminants du phénomène, sa récurrence et ses conséquences. A l'issue de la recherche des images spatiales multidates, une série d'images Landsat de 1986, 1999 et 2015 a été mobilisée (Tableau 1). La priorité a été donnée aux images de la période d'étiage, où cours de laquelle le chenal d'écoulement permanent et la bande active sont aisément identifiables.

Tableau 1 : Références des images Landsat utilisées

Année	1986	1999	2015
Références des images Landsat	p184r051 du 20/10/1986	p184r051 du 05/01/1999	p184r051 du 23/08/2014
	p184r052 du 05/02/1986	p184r052 du 05/01/1999	p184r052 du 21/01/2015
			p185r051 du 12/01/2015

Le test de la fiabilité de l'imagerie Landsat pour l'étude a nécessité une image de plus haute résolution. Une série geoeye de résolution métrique, acquise entre les mois d'octobre 2015 et mars 2016 a été utilisé à cet effet. Cette dernière a permis tout d'abord d'affiner la précision géométrique des images Landsat, en utilisant des coordonnées des points reconnaissables du réseau routier. C'est après ces corrections géométriques que les images Landsat de chaque période ont été assemblées puis découpées sur les limites de la zone d'étude. La similarité des contours du fleuve, extraites manuellement à partir des images Landsat 2015 et geoeye a permis de valider les séries suscitées pour l'étude. Les combinaisons 753 pour Landsat 2015, et 543 pour les images plus anciennes ont montré le meilleur potentiel de discrétisation des surfaces en eau et autres formes d'occupation des sols.

Pendant la cartographie manuelle du chenal sur les différentes images, l'intérêt a été porté davantage sur la bande active, qui correspond partie du lit en eau pour des débits compris entre le module et la crue de pleins bords. Elle regroupe, en plus de l'emprise des chenaux en eau, les bancs alluviaux non végétalisés, façonnés par des événements hydrologiques récents.

Une deuxième campagne de terrain, plus intense, a été conduite entre les mois de mars et de mai 2016. L'objectif était de profiter du régime d'étiage pour parcourir la rive gauche du Logone et Chari, de Maga aux confins du Lac Tchad. Les observations de terrain ont permis d'apprécier la hauteur des berges, de valider les résultats du traitement d'image et déduire les mécanismes conduisant à la dynamique des berges. Cette campagne a permis aussi d'échanger avec les populations et les autorités locales sur les enjeux de cette dynamique des berges et les mesures correctives envisageables. Les investigations se sont limitées sur la rive gauche, camerounaise. Ce choix est justifié par des impératifs de sécurité : En effet, même si l'esprit des accords et traités internationaux sur les frontières considère l'axe du chenal du Logone comme la limite naturelle entre les deux Etats, il reste que dans les pratiques, le Tchad revendique toute l'emprise du cours d'eau, et plus précisément à partir de sa confluence avec le Chari (Afouda 2010 ; Saibou, 2012). C'est dire que la berge orientale est, pour l'instant la limite de fait, de l'exercice de l'autorité et de la souveraineté camerounaise.

En ce qui concerne le traitement des données, les traits de berges issus des différentes séquences temporelles d'images ont été superposés, à l'effet de mettre en évidence les secteurs les plus dynamiques. Par la suite, Les outils de cartographie des intersections de polygones, disponibles dans les logiciels SIG ont permis d'isoler les zones d'érosion ou d'engraissement des berges. Sur un axe imaginaire suivant le tracé du cours d'eau, la distance, en mètres, du recul ou de l'avancée du trait de berges, entre deux périodes consécutives a été reporté, pour des besoins de visualisation graphique. Les données issues des entretiens avec les populations ont été organisées, synthétisées et confrontées avec la littérature existante. Ces différents traitements ont conduit aux résultats dont la quintessence est présentée dans les lignes ci-dessous.

RESULTATS

Une dynamique à sens variable, extrêmement rapide par endroits

Les résultats montrent que le tracé des berges du Logone connaît d'incessantes modifications. Les secteurs les plus dynamiques sont de toute évidence dans les secteurs ayant un tracé sinueux ou en tresses (Fig.2).

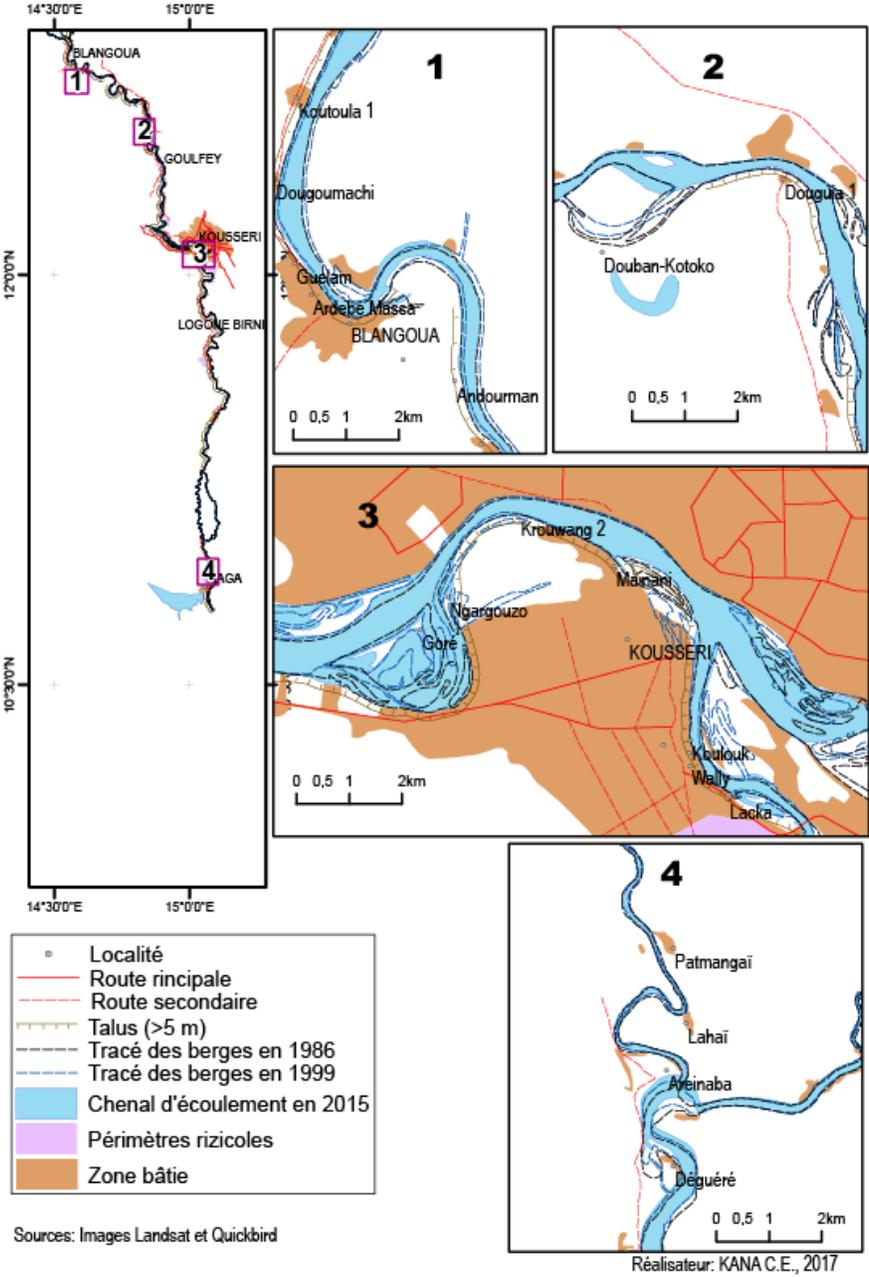


Figure 2 : Quelques illustrations de la dynamique des berges du Logone entre 1986 et 2015

Il en ressort que la dynamique des berges du Logone affecte des superficies considérables. Les superficies des zones engraisées ou érodées entre 1986 et 2015 sont cependant largement inférieures aux à la somme des superficies des périodes 1986-1999 et 1999-2015 prises séparément, qu'il s'agisse de l'engraissement ou de l'érosion ; Ce qui confirme une certaine variabilité dans le sens et la vitesse de la dynamique (Fig. 3).

Cette variabilité laisse aussi apparaître une plus grande amplitude des variations à partir de la confluence entre le Logone et le Chari, à Kousseri

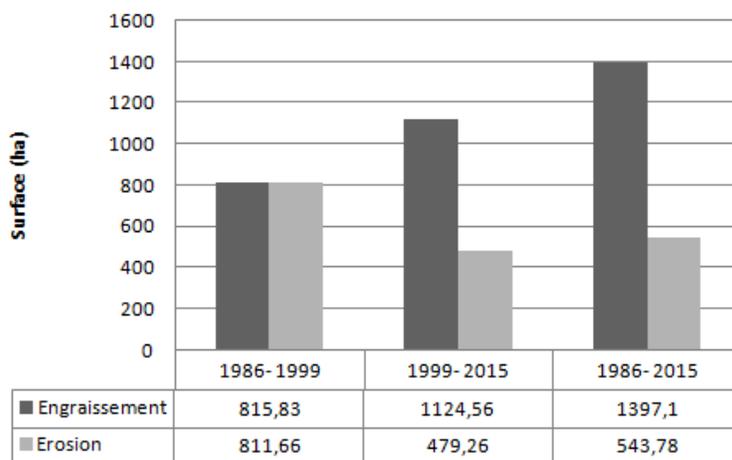


Figure 3 : Evolution des surfaces affectées par l'engraissement ou l'érosion entre 1986 et 2015.

Une amplitude des variations relativement plus importante dans la partie Nord, après la confluence du Logone et du Chari

La figure 4 ci-dessous évalue, le long d'un axe épousant approximativement l'orientation du tracé du Logone, l'écart spatial du trait de berge, entre deux dates consécutives. Cet écart est évalué sur près de 255 points, où la dynamique est visiblement rapide. Il est ressort que les variations ont une amplitude relativement forte au Nord de la ville de Kousseri. Elles oscillent entre -237 et 280 mètres entre 1986 et 1999, -200 et 171 mètres entre 1986 et 2015, alors que dans la section sud, les ordres de grandeur pour ces deux périodes sont respectivement de -170 et 141 mètres, -121 et 125 mètres.

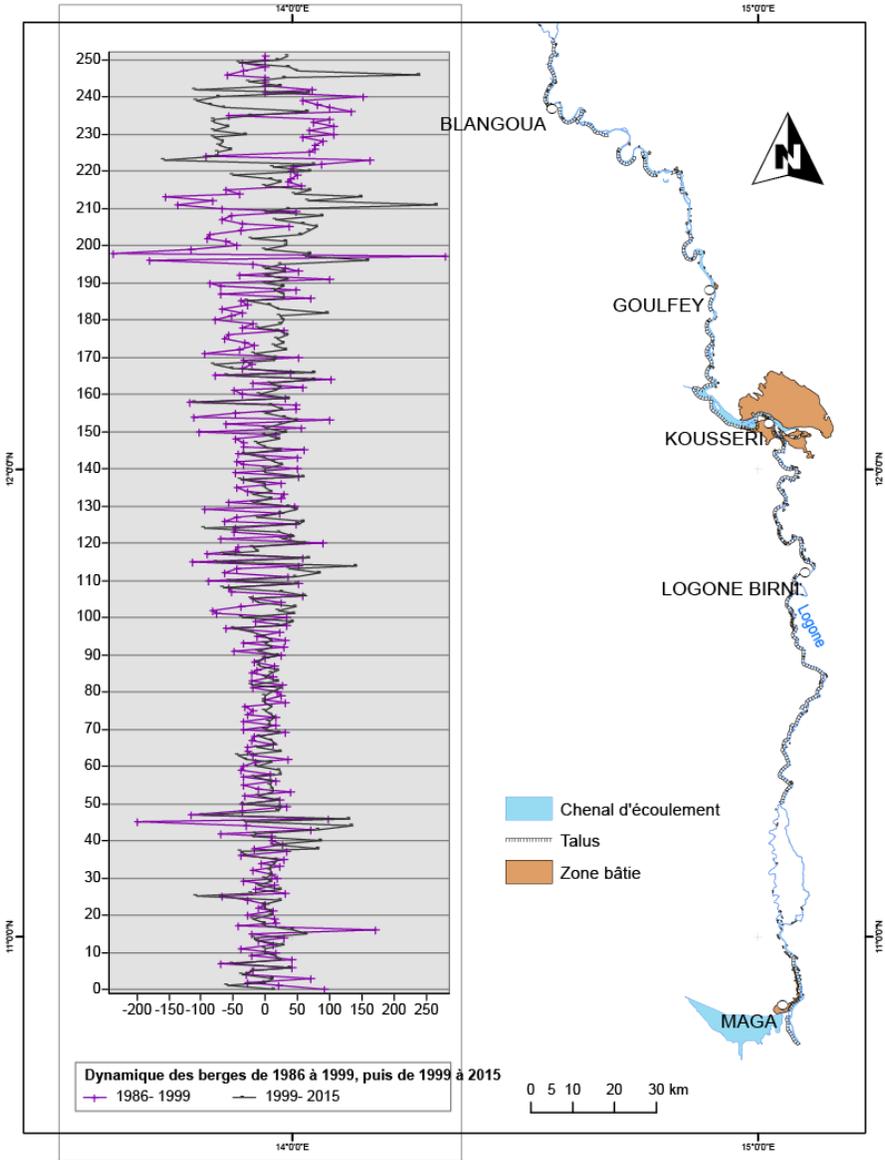


Figure 4 : Evaluation de l'avancée/recul de la berge gauche du Logone.

L'ampleur spatiale de la dynamique au Nord de Kousseri peut s'expliquer par le poids spécifique de la lame d'eau, qui devient plus importante après la confluence du *Logone* et du *Chari* (HAECON/BIRD/1988 ; Saïdou, 1995). Bien que la pente d'écoulement reste dans l'ensemble faible, le module (débit moyen annuel du fleuve) passe de 550 m³/s à Bongor au sud du Lac Maga, à 1280 m³/s à N'djamena, après la confluence Logone-Chari ; le débit maximal pouvant atteindre les pointes de 3600 m³/s au mois d'octobre et novembre (Olivry, 1986, Nghonda, 2016). L'augmentation du débit donne ainsi à l'eau assez d'énergie pour vaincre la cohésion et le poids des berges.

Il convient aussi de souligner que l'influence des facteurs anthropiques est non négligeable. En plus des défrichements anthropiques qui expose les sols à l'érosion, la fabrication des blocs de terre (Planche 1a) sur la berge contribue à modifier la micromorphologie et à exacerber le transit sédimentaire des crues, dans la recherche d'une pente d'équilibre. Les canaux de pêche (Planche 1b), largement pratiqués et en toute illégalité, participent aussi à la rupture des bourrelets de berges, augmentant les risques de défluviation.



a) Fabrication des blocs de terre sur les berges du Logone à Kousseri



b) Vue d'un canal de pêche près de Logone Birni : *C'est une espèce de défluent creusé perpendiculairement au lit d'eau, pour piéger les poissons pendant les crues*

Planche 1 : Illustrations de quelques activités humaines amplifiant l'érosion des berges

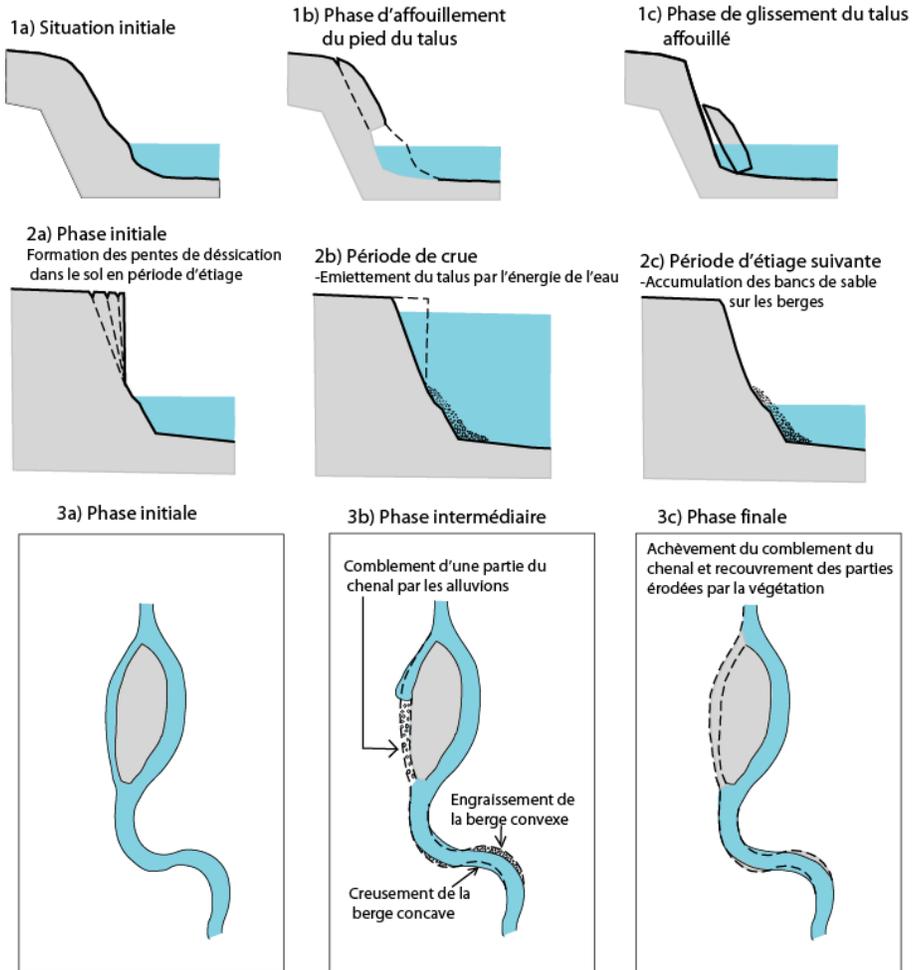
Mais, l'action humaine n'est pas forcément destructrice partout. Les enrochements des berges et la construction des murs de protection armés de béton participent aussi, par endroits comme derrière la Préfecture de Kousseri, à stabiliser les berges

Au total, la dynamique des berges du *Logone* n'est pas linéaire et constante. Elle se fait par à-coups, au gré de la succession des phases d'accumulation et

d'érosion, elles-mêmes commandées par la configuration du tracé et les variations de débits. Les processus d'érosion les plus récurrents méritent d'être présentés.

Les mécanismes d'érosion les plus récurrentes

La figure 5 ci-dessous présente les principaux mécanismes d'érosion observés.



Source : Observations de terrain

Figure 5 : Quelques mécanismes d'érosion

Le mécanisme le plus courant est le sapement du pied du talus sous l'effet de la force centrifuge de l'eau, suivi du glissement du talus en porte à faux [Fig.5 (1)]. Il s'observe le plus souvent sur les zones concaves. Le sapement est continu tout au long de l'année, même en période d'étiage. Le recouvrement discontinu du couvert végétal expose les sols, majoritairement argileux à l'évaporation. Il s'y forme des fentes de dessiccation subverticales qui constituent des plans de faiblesse exploitées par le glissement.

Par endroits, les berges évoluent aussi sous l'effet des fluctuations du débit et de la hauteur de la lame d'eau [Fig.5 (2)]. Après une crue, les hautes eaux submergent et érodent les berges latérales. Les alluvions qui en sont issues s'accumulent au pied du talus ou sont transportés et déposés sur la prochaine rupture de pentes. En période d'étiage, ces alluvions deviennent des bancs de sable émergés, qui peuvent se stabiliser pendant une longue période.

Des enjeux socio-économiques et stratégiques importants

L'incidence majeure de la dynamique des berges du Logone réside dans les pertes ou gains nets de terrains pour les riverains. Chaque année, ce sont des dizaines, voire des centaines d'hectares qui sont affectés.

Pour le cas des propriétés foncières immatriculées, les modifications des surfaces, liées à l'érosion des berges sont susceptibles de remettre en cause la tangibilité du titre de propriété, et notamment la contenance superficielle. La dégradation des berges dévalorisent donc les terrains soit en raison de la surface perdue multipliée par la valeur unitaire, soit du fait des coûts supplémentaires requis pour lutter contre l'érosion.

Dans les zones de fortes concentrations humaines, la dégradation des berges conduit à la démolition des habitations et autres équipements sociaux. En 2015, on comptait, au marché de Blangoua, près de 70 maisons de commerce et d'habitation détruites et la chute de nombreux arbres plantés sur la rive (Planche 1).

La dynamique des berges du Logone remet somme toute en cause le principe de l'immobilisme des frontières naturelles. En effet, l'existence de cette limite naturelle n'ayant pas rendu nécessaire à reconnaissance aux moyens d'outils de positionnement performants et la matérialisation physique de la frontière entre le Cameroun et le Tchad, c'est la ligne de contact entre les deux pays si se trouve ainsi modifiée sans cesse. Les essais de territorialisation des eaux du Logone par le Tchad lui confèrent de fait le droit de contrôle sur les îlots de

terre issus des fréquentes scissions du chenal d'écoulement des eaux. Ce sont des pans entiers de terrains qui passe l'un côté à l'autre de la frontière, inspirant des stratégies matérielles et immatérielles de reconquête territoriale de la part des populations établies sur les deux rives.



Planche 2 : Une vue des cases détruites dans le marché de Blangoua

DISCUSSIONS

La dynamique en cours du tracé sur les berges du Logone montre que le fleuve poursuit ses activités d'érosion et d'alluvionnement. La bande active, variable d'étude, apparaît comme une zone majeure de stockage temporaire de la charge alluviale de fond en transit (Malavoi & Souchon, 1996). Sa capacité d'ajuster ou de modifier sa morphologie d'ensemble est une réponse aux fluctuations saisonnières et interannuelles de deux variables- clés que sont le débit liquide et la charge solide. En outre, d'autres variables endogènes interviennent, occasionnant des interactions complexes entre l'hydrodynamique (débit, vitesse de rugosité, etc...), le matériel alluvial (en place ou en transit) et la géométrie du chenal (Doudje, Tchindjang & Moupeng, 2014). S'agissant du matériel alluvial, le lit majeur résulte d'un long processus d'accumulation, ayant favorisé la construction des terrasses sableuses et argileuses, peu consolidées, et par conséquent sensibles à l'érosion hydrique. Une étude similaire sur les cours inférieurs de Nottaway, Broadback et Rupert en Jamésie indiquent que les berges aux pentes abruptes, constituées de matériaux argileux ou limono-argileux sont les plus vulnérables (Saint-Laurent & Guimont, 1999).

En ce qui concerne la géométrie du chenal, le fort recul des berges, surtout dans les concavités et les secteurs à chenaux multiples est un moyen pour le cours d'eau d'optimiser sa capacité de transport ou ajuster la géométrie de son lit à des crues de taille modeste contenues entre ses berges (Paskoff, 1985). Le chenal vif se déplace en érodant sa rive concave et en déposant des sédiments en transit sur sa rive convexe. Quand les méandres atteignent un certain rayon de courbure, ils peuvent être recoupés naturellement à l'occasion de crues, devenant ainsi des bras morts qui va progressivement se combler par apports des sédiments et de matière organique (Olivry, 1974, Naah, 1990 ; Bravard, 1991)

Pour ce qui est des séquences temporelles de la dynamique des berges, l'imagerie Landsat et l'étude des profils en travers, confirment la mobilité du lit du Chari à l'échelle de temps instantanée, c'est-à-dire à l'échelle d'un cycle hydrologique annuel. D'autres études indiquent que les processus d'érosion se déroulent très souvent de façon cyclique sur les berges constituées de matériaux argileux et limono argileux sensibles à l'érosion hydrique (Mollard et Janes, 1985 ; Beven et Carling, 1989 ; Gostelow, 1996). Ils sont influencés par des rétroactions positives et négatives qui expliquent la succession des phases d'engraissement et d'érosion dans la même section du cours d'eau. L'hétérogénéité des matériaux et la diversité du litage peut aussi expliquer la dynamique érosive irrégulière et changeante au fil du temps. Quoiqu'il en soit, la présence des levées alluviales, disposées longitudinalement au lit ordinaire et séparées par des anciens chenaux, témoigne, également, de la mobilité du fleuve à travers les âges (Doudje, Tchindjang & Moupeng, 2014).

La morpho dynamique du Logone est aussi caractérisée par une dégradation du bourrelet berges permettant des déversements latéraux et des émissions de défluent sur les deux rives. A la crue en effet, le niveau des eaux du Logone est supérieur à celui des plaines avoisinantes, d'où des déversements à travers les incisions du bourrelet de berge (ERE Développement 2010, 2012). Ce phénomène est à l'origine des vagues d'inondations catastrophiques dont le pic au cours de la dernière décennie a été atteint en 2012, avec sur de 50 000 sinistrés (Kana et al, 2014).

Le régime hydrologique et des écoulements des eaux des bassins fluviaux d'Afrique de l'Ouest et du Centre ont subi une baisse drastique durant les quatre dernières décennies, suite aux contraintes climatiques (Mahé, 2001 ; Lienou et al, 2003). Le système du Logone et Chari, qui constitue l'apport principal en eau au Lac Tchad à plus de 95% n'échappe pas à cette donne. Le volume des apports décennaux dans la partie supérieure du bassin est passé de 16,8

milliards de m³ en 1961- 1970 à 9,7 milliards de m³ en 1981 – 1990, puis à 12,4 milliards m³ en 1991-2000 (Nadji, 1999 ; Baohoutou, 2007). Le résultat du traitement d'images confirme cette variabilité interannuelle des apports d'eau. En effet, la surface de la lame d'eau est passée de 11 250,2 ha en 1986 à 11 942 ha en 1999, puis, à 22 981 ha en 2015. Cette variabilité de la surface de la lame d'eau reflète certainement le contexte pluviométrique de ces trois périodes. La faible superficie de la lame d'eau en 1986 serait une conséquence les années sèches de 1983 à 1985. A l'inverse, le doublement de la lame d'eau en 1999 est à mettre au compte du regain pluviométrique dans la zone soudano-sahélienne, amorcé au cours de l'année 2012 (Kana, 2014) et qui mérite d'être confirmé par les données de la période actuelle. Cette augmentation de la lame d'eau a davantage conduit à l'immersion des îlots de sable de la bande active, et non au recul des berges.

Des études de la dynamique fluviale montre que l'érosion des berges est un phénomène normal, voire nécessaire au bon fonctionnement hydro morphologique et écologique des rivières (Roux, 1982 ; Bravard, 1991 ; Degoutte, 2002). En matière d'équilibre dynamique, les berges ont deux grandes fonctions :

- La dissipation de l'énergie du cours d'eau en s'érodant,
- La régulation hydraulique en favorisant ou en limitant les débordements du cours d'eau.

Toutefois, les mesures de protection, sans être automatiques, sont nécessaires si l'on veut sécuriser les infrastructures (bâtiments, routes), le patrimoine foncier de l'érosion et des inondations. Dans les cas où une protection est nécessaire pour la sécurité des personnes et des biens, il faudrait privilégier, dans la mesure du possible, des techniques d'ingénierie écologique. Elles présentent l'intérêt de dissiper l'énergie sans entamer l'équilibre des paysages et des milieux aquatiques paysages (Rollet, 2006 ; AAC-MAPAQ, 2008). A l'inverse, les techniques lourdes comme les enrochements ou le bétonnage, ont tendance à déplacer le problème vers l'aval et à rediriger les forces d'arrachement vers un autre secteur.

La construction d'une digue en terre compactée a été envisagée comme une solution pour sécuriser les plaines environnantes contre les inondations liées aux crues du Logone. La dégradation progressive des berges du Logone constitue cependant un risque majeur susceptible d'ébranler les fondations de la digue. Ce risque, plus élevé sur les coudes extérieurs, devrait être pris en compte dans l'ingénierie de la digue. Il est nécessaire dans les aménagements, de préserver un espace de liberté minimale autour des berges pour permettre au cours d'eau

de conserver son potentiel d'ajustement en plan et en long, en fonction de l'évolution du débit et de la charge solide.

CONCLUSION

L'étude a permis, à l'aide de l'imagerie Landsat, de cartographier à trois différentes dates la configuration des berges orientales du Logone entre la retenue de Maga et le Lac Tchad. Elle met en évidence une succession des phases d'avancée et de recul de la berge, au gré des variations saisonnières et interannuelles des paramètres hydrologiques. En outre, la nature sableuse ou limono-argileuse des alluvions qui forment le lit majeur, ainsi le faible recouvrement des sols et les modifications anthropiques de la morphologie du chenal renforcent la vulnérabilité à l'érosion. Les secteurs sinueux et en tresses sont les plus exposés. Les processus d'érosion les plus courants sont l'affouillement du pied du talus, suivi de glissement; les diffluences/comblements de bras. Les superficies en cause paraissent importantes et peuvent localement expliquer la dévaluation du patrimoine foncier et la destruction des constructions. Il est nécessaire d'envisager des mesures de protection dans les secteurs critiques, en privilégiant dans la mesure du possible les techniques du génie écologique, au détriment des techniques d'enrochement et de bétonnage qui ont souvent l'inconvénient de déplacer le problème vers l'aval.

BIBLIOGRAPHIE

- AFOUDA A.S., (2010) - Échanges transfrontaliers et organisation de l'espace dans le bassin du lac Tchad (Nigeria, Cameroun, Niger et Tchad), thèse de Doctorat en géographie, Université de Bordeaux 3, France.
- Agriculture et Agroalimentaire Canada (AAC) et le Ministère de l'Agriculture, des Pêcheries et de l'Alimentation du Québec (MAPAQ). (2008) - Diagnostic et solutions des problèmes d'érosion des berges de cours d'eau, Fiche Technique. Québec, Canada, 14 pages
- BAOHOUTOU, L., (2007) : Précipitations en zone soudanienne tchadienne durant les quatre décennies (60-99) : variabilités et impacts. Thèse de doctorat, Université de Nice Sophia Antipolis, 235 p.
- BCEOM, (1964). Essais de protection des berges du Chari, N'Djamena, Tchad, 53p.
- BEVEN, K. ET CARLING, P. (édit.), (1989) - Floods: Hydrological, Sedimentological and Geomorphological Implications, Wiley, Chichester, 290 p.

- BILLON, B., GUISCAFRE, J., HERBAUD, J. & OBERLIN, G. (1974) - Le bassin du fleuve Chari. O.R.S.T.O.M., Paris, 450 p.
- BRAVARD J.P., (1991) - La dynamique fluviale à l'épreuve des changements environnementaux : quels enseignements applicables à l'aménagement des rivières, Houille blanche N°7/8, 8 pages, <http://www.shf-lhb.org> or <http://dx.doi.org/10.1051/lhb/1991047> (consulté le 12/02/2017)
- CHOURET A., (1975) - Le Lac Tchad et son système d'alimentation : conséquences des périodes de sécheresses, Notes techniques du Centre ORSTOM de N'djamena, N° 8, 18 pages
- DEGOUTTE G. (2002) - Hydraulique et dynamique fluviale appliquées au diagnostic, à l'aménagement et à la gestion des rivières. Collection ouvrages pédagogique, Edit., ENGREF, 306 p.
- DOUDJE K., TCHINDJANG M., & MOUPENG B., (2014) - Evolution du lit majeur du fleuve Chari à N'djamena de l'Holocène à nos jours, *Geo-Eco-Trop*, 38 :1 n.s, pp : 75- 84
- ERE Développement (2010) - Rapport d'étude, digue du Logone : Phase 1. Province de l'Extrême Nord. MINPLADAT, Yaoundé, Cameroun
- ERE Développement. (2012) - Rapport d'étude de la digue de la Logone. Phase 2. Extrême Nord. MINPLADAT, Yaoundé, Cameroun
- GOSTELOW, T. P., 1996 -Landslides, in V. P. Singh, (édit.): *Hydrology of Disasters*. Water Science and Technology Library, Netherlands, pp:183-230
- HAECON /BIRD/ PNUD, (1988) - Etude de l'érosion des berges du Chari à N'Djamena , Rapport d'expertise, 58p.
- KANA C.E., NGHONDA J.P., NGUENDO YONGSI H.B., 2013. - Inondations récentes dans le Nord Cameroun : des communautés vulnérables à l'épreuve des changements climatiques », *Int. J. Adv. Stud. Res. Africa*. 2013, 4 (1), Université de Montréal, Canada ; 14 page.
- LIENOU G, SIGHOMNOU D, SIGHA-NKAMDJOU L., (2003) - Système hydrologique du Yaéré (Extrême-Nord Cameroun), changements climatiques et actions anthropiques: conséquences sur le bilan des transferts superficiels, *IAHS Publ.*, N° 278 pp : 403-409
- MAHÉ G., L'HOTE Y., OLIVRY J.C., WOLTLING G., (2001) - Trends and discontinuities in regional rainfall of west and central Africa – 1951-1989. *Hydrological Sciences Journal*, 46, 2, 211-226.
- MALAVOI J.R. & SOUCHON Y., (1996) - Dynamique fluviale et dynamique écologique, Dossier in *Houille blanche* 6/7, 10 pages
- MOLLARD, J.D. ET JANES, J.R., (1985) - La photo-interprétation et le territoire canadien. *Approvisionnement et Services Canada*, 424 p

- NGHONDA J.P. (2016) –Des basses terres régulièrement affectées par des crises de l'eau (Chapitre 1) in: Kana C.E (edit). Le Logone-et-Chari : une zone frontalière aux abords du Lac Tchad, Coll. Monographies départementales, Eds. Terroirs, pp :29- 48
- NAAH E., (1990) - Hydrologie du Grand Yaéré du Nord-Cameroun. Thèse de Doctorat ès-Sciences, Université de Yaoundé, 326 p.
- NADJI T.,W., (1999) - Les Ressources en Eau du Bassin Supérieur du Logone (Tchad - Cameroun et RCA) en liaison avec la Variabilité Climatique de 1961 à 1990, Diplôme d'Université, 3ème cycle, Faculté des Sciences, Université Nice-Sophia Antipolis, pp 57.
- OLIVRY J.-C., (1974) - Les déficits hydro pluviométriques au Cameroun pendant les années sèches, 1972 et 1973, ORSTOM, 71 p.
- OLIVRY J.C., (1986) - Fleuves et rivières du Cameroun. Monographies hydrologiques, MESRES/ORSTOM, n° 9, 733 p
- PASKOFF R. (1985) - Les littoraux - Impacts des aménagements sur leur évolution, 3ème édition. Masson et Armand Colin Éditeurs. Paris. 260 pages.
- ROLLET A.-J., (2006) - Etude et gestion de la sédimentaire d'un tronçon fluvial en aval d'un barrage : le cas de la basse vallée de l'Ain, Thèse de doctorat de géographie et aménagement, Univ. Jean Moulin Lyon, France, 305 pages
- ROUPSARD M., (2000) – Production rizicole (Planche 18), in Seignobos & Iyebi-Mandjek (edit) - Atlas de la Province de l'Extrême Nord de Cameroun. IRD/MINREST/INC, Editions IRD France, pp : 98- 101.
- ROUX A.L. (ed), (1982) - Cartographie polythématique appliquée à la gestion écologique des eaux; étude d'un hydro système fluvial : le Haut-Rhône français. Edit. CNRS, Centre Région. Publ. Lyon, 116 p.
- SAÏBOU I., (2012) -Ethnicité, frontières et stabilité aux confins du Cameroun, du Nigéria et du Tchad, Paris, L'Harmattan, 151 p.
- SAÏDOU, A., (1995) - Etude du régime de débit au niveau de la confluence Chari-Logone (Tchad). Mémoire de fin d'étude d'ingénieur en hydrologie, Centre régional AGRHYMET, Niamey, 99p.
- SAINT LAURENT D., & GUIMONT P., (1999) -Dynamique fluviale et évolution des berges du cours inférieur des rivières Nottaway, Broadback et de Rupert, en Jamésie (Québec) in Géographie physique et Quaternaire, vol. 53, n° 3, 1999, p. 389-399 URI: <http://id.erudit.org/iderudit/004866ar/DOI: 10.7202/004866ar> (consulté le 08/02/2017)
- SEIGNOBOS, C. & IYÉBI-MANDJEK, O. (2000) - Atlas de la Province de l'Extrême Nord de Cameroun. IRD/MINREST/INC, Editions IRD France, 172 pages.