

# Variabilité des crues et des paysages du lac Fitri depuis les grandes sécheresses des années 1970-1980

*Tashi YALIKUN, Christine RAIMOND,  
Angeline KEMSOL NAGORNGAR, Dangbet ZAKINET,  
Mathieu SCHUSTER, Florence SYLVESTRE*

## Introduction

L'importance des zones humides tropicales est reconnue à l'échelle internationale, tant pour leur biodiversité, leur rôle écosystémique, que pour les ressources qu'elles fournissent aux sociétés (MADGWICK et PEARCE, 2017). À cette échelle, un constat de déclin s'affirme aussi bien en superficie qu'en qualité (GARDNER *et al.*, 2015 ; CREED *et al.*, 2017). Au Sahel, les zones humides sont vitales pour les populations, notamment pendant la saison sèche. Si les chercheurs démontrent le caractère réversible de l'extension de certains lacs, comme le lac Tchad qui se stabilise à un état de « Petit lac » après les sécheresses des années 1970-1980 (MAGRIN *et al.*, 2015), les études peinent à prendre en compte la variabilité inter et intra-annuelle qui caractérise les régimes hydrologiques des lacs sahéliens. « À ce rythme d'exploitation et sans changer le mode actuel d'utilisation [...] la perte d'habitats et de biodiversité, mais aussi de systèmes productifs et de ressources vitales pour la survie de la population, est inévitable » : cette conclusion alarmiste de l'évaluation de la zone de biosphère du Fitri par le BEGC (2016) ne tient pas compte de l'évolution des ressources du lac, liée à celle de la pluviométrie dans son bassin versant. L'objectif de cet article est de préciser cette variabilité inter et intra-annuelle. L'acquisition d'images satellitaires entre

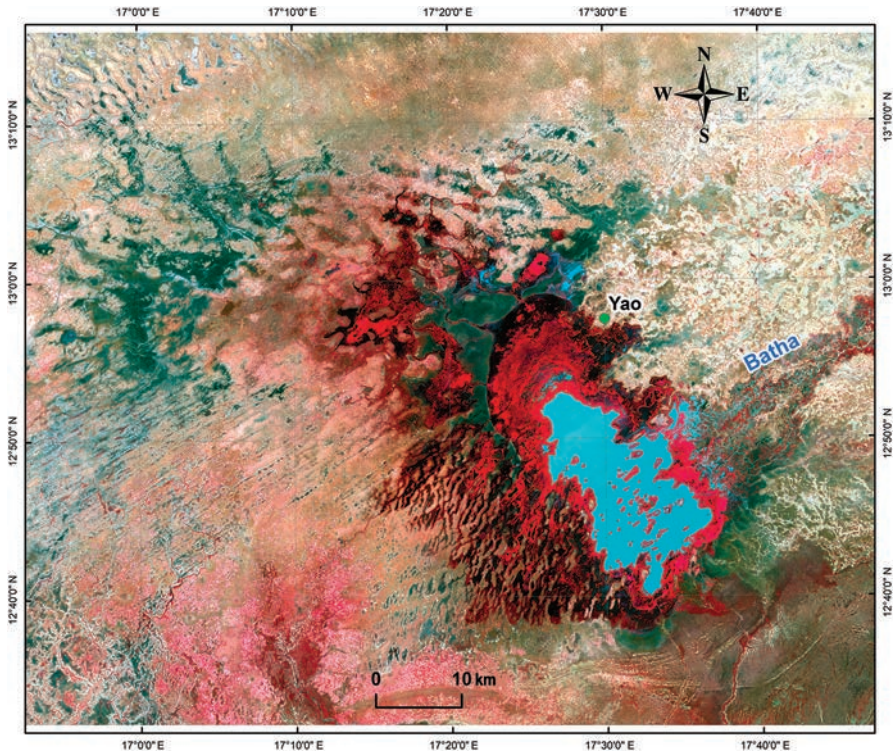
1972 et 2015 fournit un suivi annuel pour cette période ; un suivi mensuel est réalisé pour l'année 2015. Une méthodologie originale a été expérimentée pour discriminer les eaux libres et la végétation marécageuse qui composent la zone humide. L'analyse des résultats contribue à mieux comprendre le fonctionnement du lac sur le court et le moyen terme, ainsi que l'évolution des surfaces de la zone humide où se concentrent les ressources disponibles en saison sèche.

Une étude aux objectifs similaires existe pour le lac Tchad (LEBLANC *et al.*, 2011), à partir d'une méthodologie qui utilise les données thermiques (Tmax) du satellite Météosat pour identifier les eaux couvertes de végétation aquatique et fournit une série chronologique mensuelle d'estimations de la superficie totale inondée pour le lac Tchad entre 1986 et 2001. Cette technique tire parti de la résolution temporelle élevée et du capteur thermique du satellite géosynchrone pour cartographier les eaux libres et les eaux couvertes de végétation aquatique dans de grandes masses d'eau comme le « Petit » lac Tchad dont la superficie varie entre 3 000 et 14 000 km<sup>2</sup>. Elle est inadaptée pour un plan d'eau de taille relativement petite, en raison de la faible résolution spatiale des données Météosat qui est de 5 km<sup>2</sup>. Nous proposons une nouvelle technique qui profite de la haute résolution spatiale pour une bonne répétitivité des données de télédétection optique. Elle permet de cartographier avec une précision plus élevée les zones humides de régions lacustres en zone aride et semi-aride pour suivre leurs variations à court et à long terme.

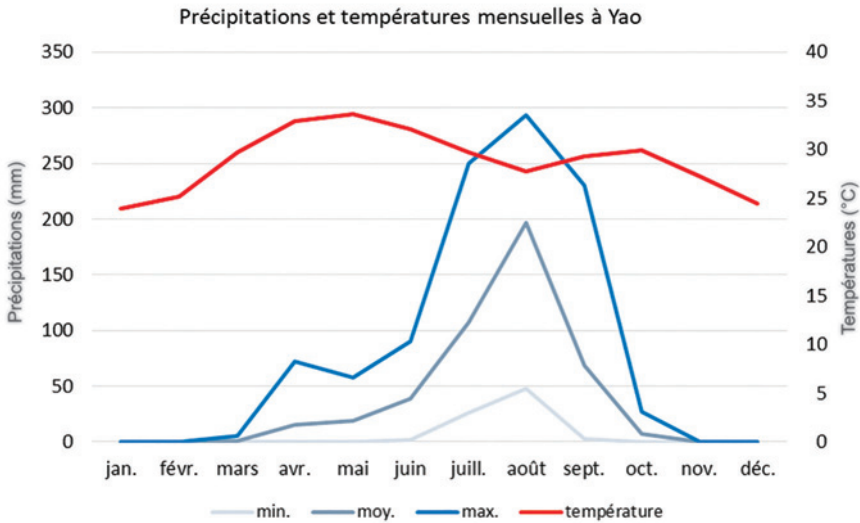
## Délimitation et caractéristiques de la zone d'étude

Centré sur 12° 50' N et 17° 30' E, le lac Fitri est situé à 300 km à l'est de N'Djamena dans une plaine alluviale à la topographie peu prononcée. Il se situe, tout comme le lac Tchad, dans les limites du Mégalac Tchad holocène (LEBLANC *et al.*, 2006 ; SCHUSTER *et al.*, ce volume) (fig. 1). D'un point de vue administratif, il fait partie du département de Fitri dans la région du Batha et son chef-lieu, Yao est également le siège du sultanat bilala. Il est situé sur une presqu'île à proximité de l'unique pointement rocheux de la région. Le lac Fitri est labellisé zone Ramsar depuis le 13 juin 1990.

Le climat est marqué par l'alternance d'une saison des pluies de quatre à cinq mois (fig. 2), centrée sur le mois d'août, et d'une saison sèche de six à sept mois, en partie hivernale de décembre à février avec des températures comprises entre 11 et 22 °C. Les maxima de température (40-41 °C) sont généralement observés au mois d'avril. Les précipitations sont marquées par une forte irrégularité dans leur répartition tant spatiale que temporelle (NIEL *et al.*, 2005) (fig. 3).



**Figure 1**  
 Zone d'étude. Image Landsat 8 OLI du 13/10/2015.  
 Source : Landsat 8.



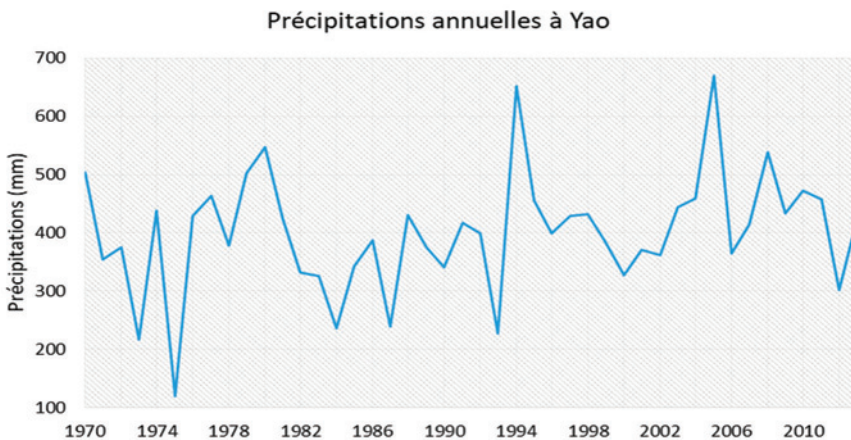
**Figure 2**  
 Graphique ombrothermique pour la station de Yao représentant les moyennes mensuelles de précipitations et de températures de 1983 à 2013.  
 Source : Drem.

Cette irrégularité s'explique par la distribution du flux de la mousson guinéenne, principale source d'humidité. Il a plu en moyenne 400 mm à Yao entre 1970 et 2013 avec des variations interannuelles allant jusqu'à 669 mm en 2005 contre seulement 121 mm en 1975.

L'évolution saisonnière de l'humidité relative de l'air est identique à celle des précipitations, le maximum se situe en juillet et août, de l'ordre de 85 à 90 %. L'évaporation annuelle est très élevée, en moyenne comprise entre 3 775 et 4 000 mm (BEGC, 2016).

Le réseau hydrographique est constitué de plusieurs cours d'eau intermittents dont le plus important est le fleuve Batha (60 % des apports), avec ses affluents le Melmélé, le Zilla, le Zerzer et l'Abourda (BIEP, 1989). Il est complété par les rivières venant du massif central tchadien. La superficie moyenne du lac de 800 km<sup>2</sup> (LEMOALLE, 1979) est en fait très variable d'une année à l'autre et d'une saison à l'autre. Le lac s'est complètement asséché en 1901, 1973 et 1985. Il aurait aussi atteint une superficie maximale de 1 300 km<sup>2</sup> en 1970 (LEMOALLE, 1979).

La végétation s'organise en auréoles autour des eaux libres. Au-delà de la cuvette entièrement végétalisée, plusieurs grandes plaines sont inondées par la crue du lac ou des principaux cours d'eau, dont les plaines de Manga (rives nord du lac), Dogo (rives nord-est du lac) et Gamsa (delta du Batha). Elles sont cultivées en sorgho repiqué (berbéré, *Sorghum bicolor*). Les rives sud-ouest apparaissent plus hétérogènes du fait d'avancées lacustres à l'intérieur d'une série sableuse ancienne constituée par des dunes fixées, orientées nord-est/sud-ouest. Ces dunes, où sont installés les villages, surplombent les dépressions de 3 à 4 m où les vertisols à boisement dense d'*Acacia seyal* sont cultivés, après défrichage, en berbéré.



**Figure 3**  
Évolution des précipitations annuelles à Yao de 1970 à 2013.  
Source : Drem.

À l'extérieur de ce système, les cuvettes argileuses alimentées par l'eau des pluies et les nappes affleurantes sont également repiquées en sorgho. Autour, la steppe sahélienne présente une strate arborée plus ou moins dense en fonction de la disponibilité en eau. Elle se dessèche très vite à la fin de la saison pluvieuse. Les prairies à l'ouest ne sont pas cultivées et principalement exploitées par les éleveurs. Le nord-est est plus peuplé et composé d'une mosaïque de villages, de champs de saison des pluies et de pâturages. Les éleveurs les exploitent avant les récoltes de berbéré, puis mènent les troupeaux dans les pâturages aquatiques.

Il est devenu courant au Fitri d'entendre dire que « les eaux du lac se vident à l'ouest », alors que ce n'était pas observé auparavant (com. pers., enquêtes de terrain 2015). Pour vérifier cette observation, nous avons choisi de délimiter une zone d'étude qui couvre les mares situées au nord-ouest du lac, occasionnellement inondées. Ainsi, la zone d'étude est comprise entre 12° 32' 10" N - 13° 15' 55" N et 16° 52' 20" E - 17° 48' 06" E. Elle s'étend sur 8 135 km<sup>2</sup> et couvre le lac Fitri et les plaines inondables environnantes (fig. 1). Fortement inondable, cette zone reste enclavée plus de trois mois dans l'année à partir du mois d'août.

## Méthodologie

### Collection de données

Nous avons collecté au total 42 images des satellites Landsat (38 scènes) et Spot<sup>1</sup> (4 scènes) entre 1972 et 2015 (tabl. 1). Les images Landsat viennent des capteurs MSS (Multispectral Scanner, résolution : 80 m, 1 scène), TM (Thematic Mapper, résolution : 30 m, 5 scènes), ETM+ (Enhanced Thematic Mapper Plus, résolution : 30 m, 8 scènes) et OLI (Operational Land Imager, résolution : 30 m, 24 scènes). La sélection des images suit plusieurs critères : une par année depuis les premiers satellites au moment de la crue (octobre) pour avoir des images comparables, et une image par mois pour un suivi mensuel sur l'année 2015, qui correspond aux observations de terrain.

Les images Landsat apportent une couverture quasi synoptique de très grandes surfaces (chaque scène couvre 32 400 km<sup>2</sup>), une faible déformation géométrique, une bonne répétitivité et des données multispectrales pour une meilleure différenciation des composants du milieu. Les images Spot sont utilisées pour compléter la série pendant les années où les images Landsat ne sont pas disponibles. Malgré une résolution spectrale plus faible (4 canaux) et une couverture au sol contraignante (60 km × 60 km, soient 3 600 km<sup>2</sup>), les hautes et très hautes résolutions spatiales des images Spot (20 m à 2,5 m) s'avèrent

très utiles pour préciser les lignes de rivages, les transitions souvent progressives des hauteurs d'eau, les sédiments et le sol humide, ou bien entre l'eau, les macrophytes aquatiques et une couverture végétale dense sur terrain sec.

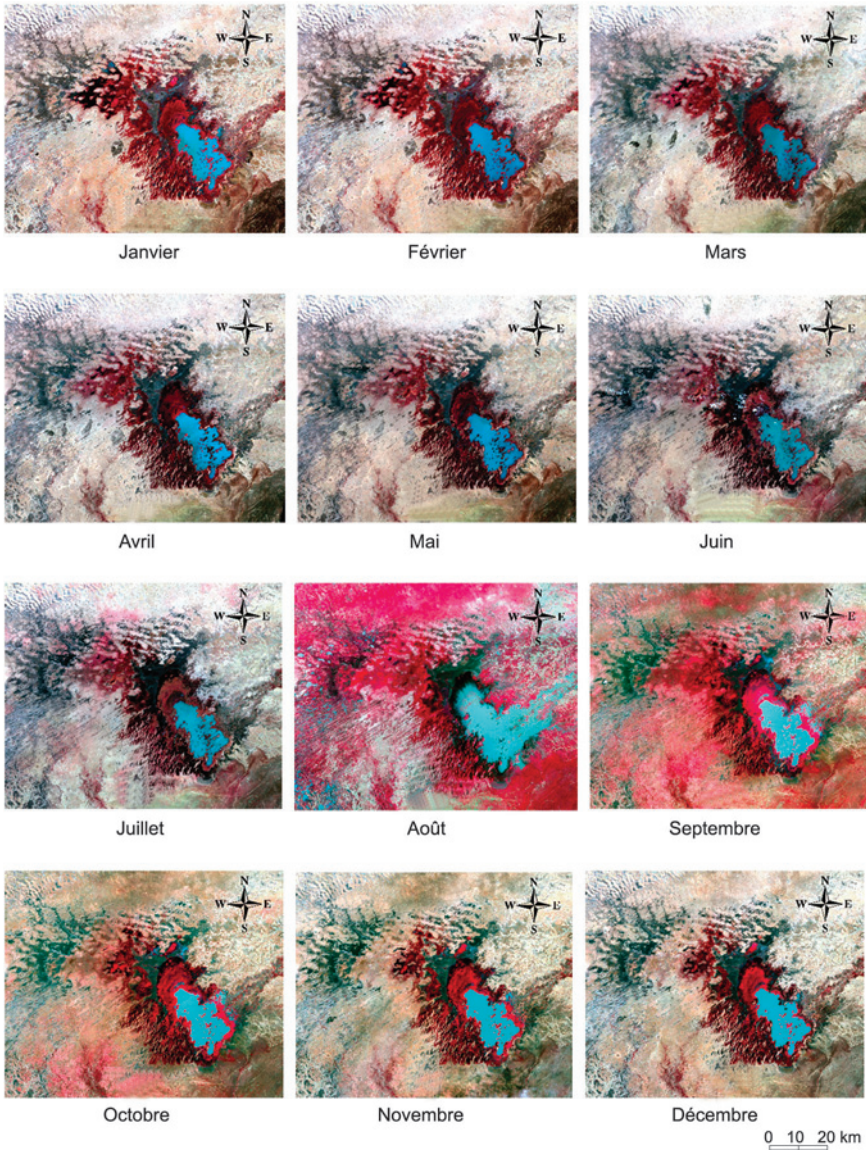
Tableau 1  
Images satellitaires collectées sur le lac Fitri.

Année	janv.	févr.	mars	avr.	mai	juin	juill.	août	sept.	oct.	nov.	déc.	Satellite
1972										30 oct.			Landsat 1 MSS
1986		18 févr.								13 oct.			Landsat 5 TM
1987			6 mars							16 oct.			Landsat 5 TM
1995	27 janv.												Spot 3
1998												1 <sup>er</sup> déc.	Landsat 5 TM
1999												12 déc.	Landsat 7 ETM+
2000		14 févr.								27 oct.	28 nov.		Landsat 7 ETM+
2001					7 mai								Landsat 7 ETM+
2002											18 nov.		Landsat 7 ETM+
2003				11 avr.	13 mai								Landsat 7 ETM+
2006	17 janv.												Spot 5
2008													Landsat 7 ETM+
2009									16 sept.				Spot 4
2011										9 oct.			Spot 5
2013					16 mai	17 juin				23 oct.	8 nov.		Landsat 8 OLI
2014	11 janv.	12 févr.			19 mai	20 juin			24 sept.	26 oct.	27 nov.	29 déc.	Landsat 8 OLI
2015	14 janv.	15 févr.	19 mars	20 avr.	22 mai	23 juin	9 juill.	10 août	27 sept.	13 oct.	14 nov.	16 déc.	Landsat 8 OLI

## Traitement des images

### Composition colorée

Les compositions colorées proche infrarouge (PIR), rouge (R) et vert (V) des 12 images Landsat 8 de 2015 montrent les variations mensuelles du paysage en périodes de crue et de décrue (fig. 4). Les eaux libres se distinguent facilement en raison de la faible luminance de l'eau dans le PIR et prennent des couleurs allant du bleu au turquoise. Leur étendue maximale se situe au mois d'août, en saison des pluies, tandis que les mois d'avril, mai et juin correspondent aux périodes sèches. Autour, une végétation marécageuse dense et verte, donc en pleine activité chlorophyllienne, se caractérise par sa forte luminance dans le canal PIR et s'affiche en rouge. Dans ces secteurs végétalisés, il est difficile d'estimer la profondeur de l'eau, qui peut varier de 0 à 4 m. La végétation de marécage contraste facilement avec la végétation des pourtours du lac, plus sèche et moins dense, même durant la saison des pluies.



**Figure 4**

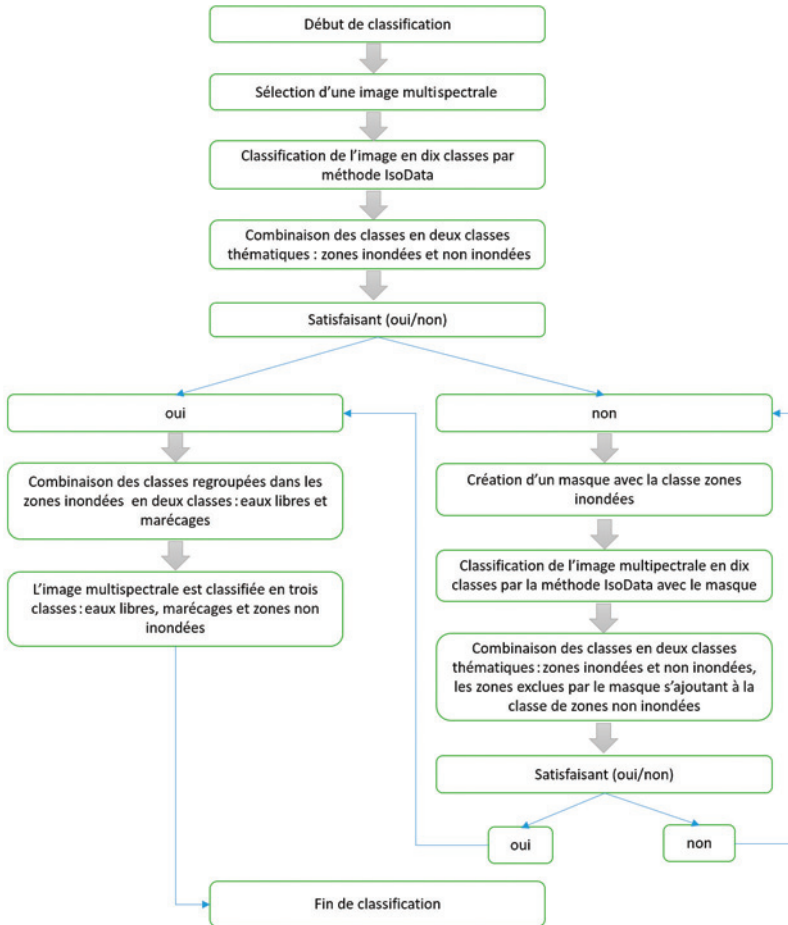
Images Landsat 8 des mois de 2015 en composition colorée proche infrarouge, rouge et vert.

Source : Landsat 8.

### Classification

Un schéma général de classification est élaboré pour classer et comparer les résultats entre images multispectrales et multicapteurs (fig. 5). Le flux de travail commence par une classification en 10 classes par IsoData (TOU et GONZALEZ,

1974). Cette méthode de classification non supervisée examine les signatures spectrales de tous les pixels de l'image et détermine des groupements selon un nombre de classes fixé. Ici, 10 classes thématiques cohérentes différencient les principaux composants du milieu, qui sont ensuite combinées en 2 classes : zones inondées (eaux libres et marécages) et non inondées, validées par notre connaissance du terrain (2015-2016). En cas de résultat non satisfaisant, un masque est créé sur la classe « zones inondées » pour exclure les sources de confusion. L'image sous masque est reclassée en 10 classes, qui sont ensuite regroupées en zones inondées et non inondées. Les zones exclues par le masque s'ajoutent à la classe de zones non inondées. Cette procédure est répétée autant de fois que nécessaire pour correspondre à la vérité terrain. Lorsque le résultat



**Figure 5**  
Méthodologie de classification d'images satellite en 3 classes :  
eaux libres, marécages et zones non inondées.



est satisfaisant, les zones inondées sont divisées en 2 classes : eaux libres et marécages.

Plusieurs approches de validation et d'évaluation de la qualité des résultats d'une classification sont disponibles (CONGALTON, 1991). Pour les images du Fitri, les coefficients Kappa<sup>2</sup> (COHEN, 1960) sont compris entre 0,63 et 0,87, avec des précisions globales (le nombre de pixels bien classés divisé par le nombre de pixels total) des classifications comprises entre 76,52 % et 91,41 % (tabl. 2). Les résultats sont donc « bons » à « excellents ». Les données de terrain, cartes thématiques et l'imagerie satellite à très haute résolution (Spot, Google Earth) ont été utilisées pour générer des points de contrôle et ont servi comme deuxième outil qualitatif de validation des résultats.

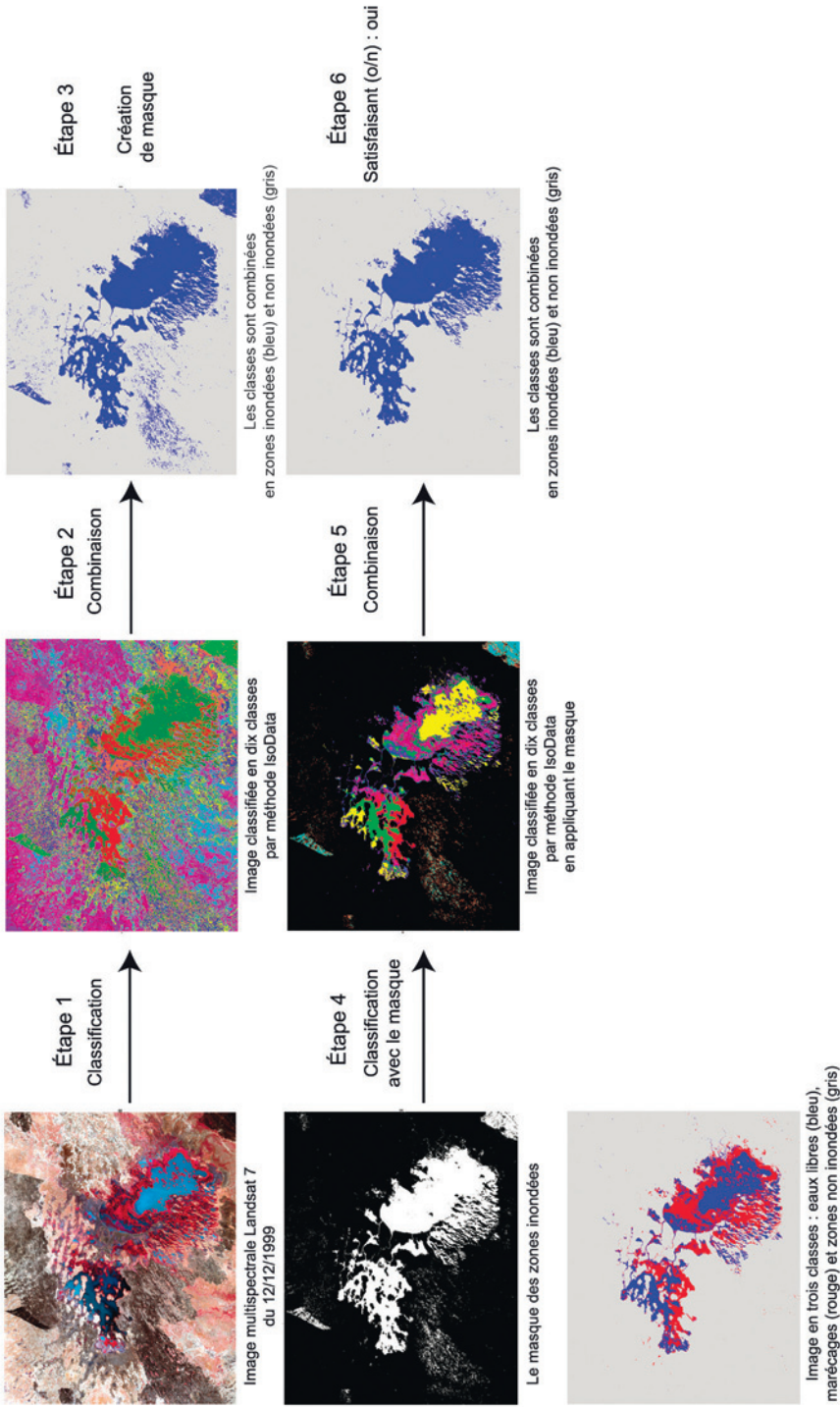
Tableau 2  
Précision globale de classification et coefficient Kappa.

Date de prise d'images	oct. 1972	févr. 1986	oct. 1986	mars 1987	oct. 1987	déc. 1998	déc. 1999	oct. 2000	mai 2001	nov. 2002	mai 2003	oct. 2013	oct. 2014	oct. 2015
Précision globale (%)	88	76,52	89,57	86	82,05	86,52	89,36	77,27	79,49	83,33	80,37	87,04	91,41	90,18
Coefficient Kappa	0,81	0,63	0,84	0,73	0,72	0,79	0,84	0,66	0,68	0,75	0,69	0,8	0,87	0,85

La figure 6 montre en six étapes une implémentation de la méthodologie pour l'image du Landsat 7 ETM+ du 12/12/1999. Un seul masque a été créé dans ce cas, mais le nombre de masques à créer peut varier selon la résolution spectrale (nombre de canaux), la qualité de l'image et les conditions atmosphériques (nuages). Ainsi, 0 à 1 masque a été créé pour les images du Landsat 8 OLI, 3 masques pour l'image Landsat MSS, 1 à 2 masques pour les autres capteurs.

La classification a été appliquée d'abord sur les images de 2015, car les données de terrain nombreuses (point GPS, cartes, notes de terrain), la haute qualité et la bonne fréquence des images du Landsat 8 couvrant tous les mois de l'année ont assuré une bonne interprétation des données. Cette base de comparaison a limité les risques d'erreur d'interprétation pour les classifications des images des autres années.

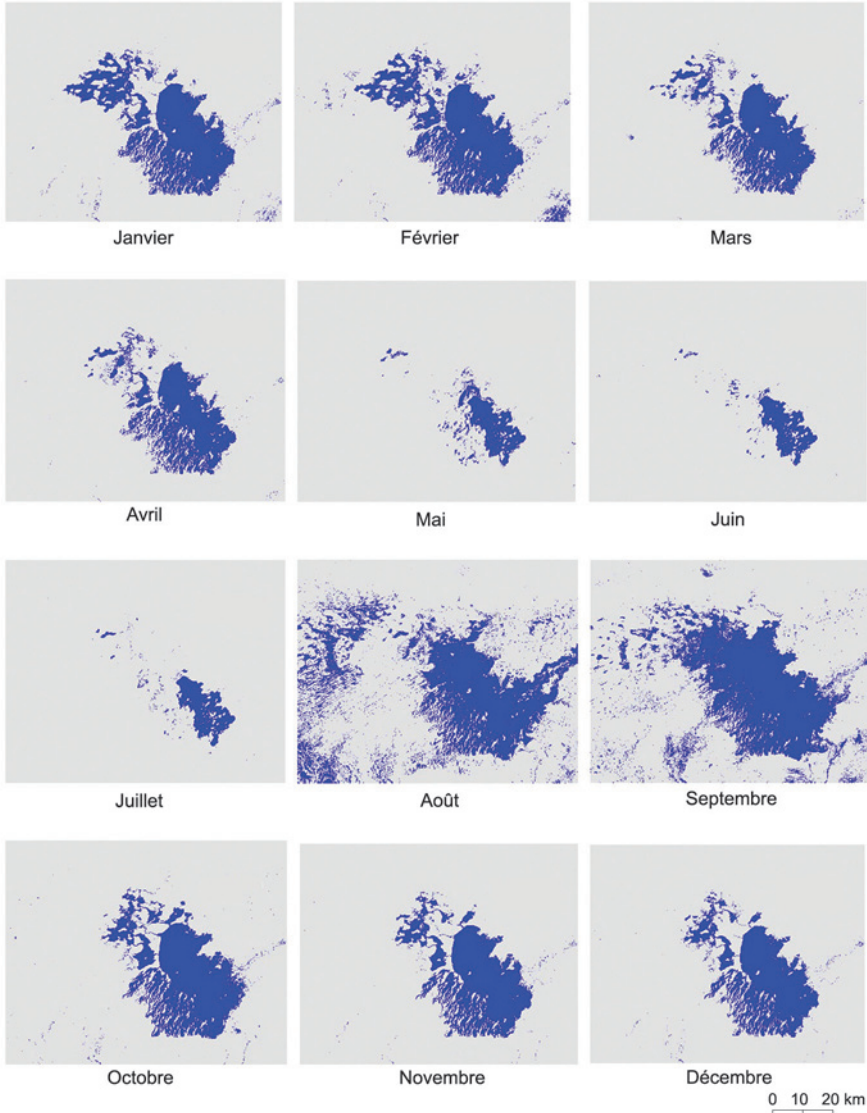
2. Le coefficient Kappa est une approche quantitative qui utilise tous les éléments de la matrice de confusion et tient compte à la fois des erreurs de commission et d'omission. C'est un nombre réel compris entre -1 et 1 : l'accord est d'autant plus élevé que la valeur de Kappa est proche de 1. LANDIS ET KOCH (1977) proposent les interprétations suivantes : kappa < 0,0 très mauvais ; 0,0-0,2 mauvais ; 0,21-0,4 médiocre ; 0,41-0,6 modéré ; 0,61-0,80 bon ; ≥ 0,81 excellent.



**Figure 6**  
Classification en 6 étapes de l'image Landsat 7 ETM+ du 12/12/1999.  
Source : Landsat 7.

## Suivi mensuel de la crue de 2015

La figure 7 montre les résultats de la classification en 2 classes (zones inondées et non inondées) des images Landsat 8 de l'année 2015. Ici, les eaux libres et les marécages ne sont pas distingués. Les fluctuations de la zone humide suivent



**Figure 7**  
*Variations mensuelles de la zone humide en 2015.*  
Source : Images Landsat 8.

les rythmes connus en zone sahélienne (fig. 2). À l'étiage, en mai et juin, la zone humide est quasiment réduite à la superficie des eaux libres, soient 220 km<sup>2</sup> (tabl. 3). La crue intervient en août et septembre : pendant ces deux mois, la superficie de la zone humide est multipliée par huit et dépasse 1 700 km<sup>2</sup>. Les eaux du Batha contribuent à la crue dès le mois d'août : les rives de cette rivière très humides pendant ce mois s'assèchent en septembre quand son cours se tarit. Les eaux progressent en ennoyant toute la cuvette nord et les espaces interdunaires au sud-ouest.

Tableau 3  
Superficies de la zone humide (km<sup>2</sup>) d'après la classification des images de 2015.

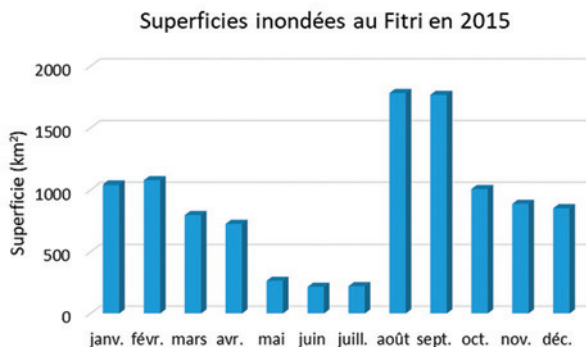
mois	janv.	févr.	mars	avr.	mai	juin	juill.	août	sept.	oct.	nov.	déc.
<b>Surface</b>	1 041	1 075	797	726	265	215	221	1 782	1 767	1 008	889	853

À cette période, les villages sont abandonnés pour plusieurs mois. Les habitants se déplacent vers les villages des zones exondées où ils cultivent le mil et le sorgho. Ils ne reviennent qu'au moment de la décrue, en octobre ou novembre (fig. 8) afin de repiquer le berbéré. C'est après cette période que les troupeaux des éleveurs transhumants arrivent pour la saison sèche ; ils repartent dans les pâturages sahéliens avec l'arrivée des pluies et avant que la région ne soit à nouveau ennoyée.

Le delta du Batha et le secteur de Yao restent inondés le plus longtemps. Au nord, les vertisols absorbent très rapidement l'eau, alors que la végétation marécageuse s'installe plus durablement à l'intérieur d'une ancienne ligne de rivage du lac Fitri<sup>3</sup>. Celle-ci se remarque à peine sur le terrain mais signe une courbe très nette vue du ciel, au travers de laquelle plusieurs chenaux déversent l'eau dans les mares situées plus à l'ouest. Au sud-est, la décrue fait émerger progressivement le relief dunaire modelant le fond du lac.

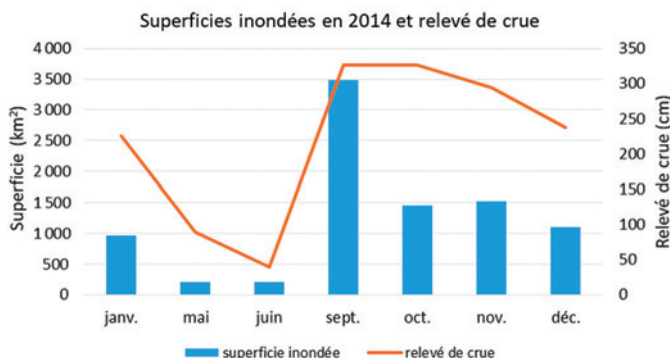
La même analyse réalisée pour l'année 2014, avec les 7 images Landsat disponibles, confirme le rythme et le rapport des superficies entre étiage en juin et crue en septembre (fig. 9). Ces résultats de l'analyse par télédétection sont cohérents avec les données de l'échelle de crue installée à Yao en 1986. La crue correspond donc bien au cumul des eaux de pluies sur le bassin versant, apportées par le Batha, et celles qui tombent localement à Yao (25 % des apports d'après COUREL *et al.*, 2005). Il reste à confirmer la superficie particulièrement élevée de la zone humide calculée à 3 500 km<sup>2</sup> pour septembre 2014 contre 1 750 km<sup>2</sup> en septembre 2015. C'est aussi pour le mois d'août que la confusion avec la végétation active, qui ne dépend pas directement de la zone inondable, est la plus grande. Il est donc possible que les valeurs obtenues pour ce mois soient surestimées.

3. La datation de cette ancienne ligne de rivage et sa relation avec le Mégalac Tchad restent à préciser.



**Figure 8**

Variations mensuelles des superficies de la zone humide du lac Fitri en 2015.



**Figure 9**

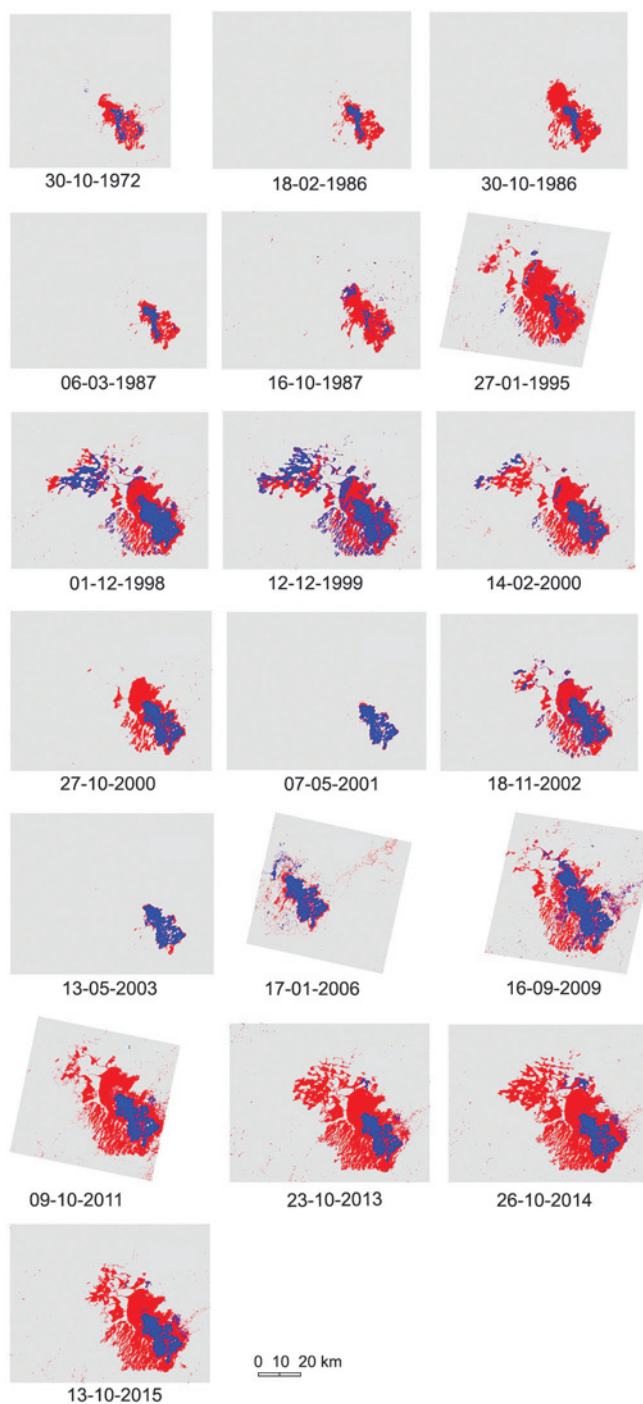
Comparaison entre la superficie de la zone humide en 2014 calculée par télédétection et la hauteur de crue à Yao aux mêmes dates.

Sources : Landsat 8, Drem.

## Une zone humide en expansion de 1972 à 2015

La classification en 3 classes – eaux libres, marécages et zones non inondées – des images Landsat et Spot montre la variabilité des crues du lac Fitri entre 1972 et 2015 (fig. 10).

L'année 1972 correspond aux premières images Landsat. C'est aussi une année de grande sécheresse au Sahel. Au Fitri, les faibles pluies accumulées dans le bassin versant ont tellement réduit l'extension de la zone humide que le lac s'est asséché au cours de la saison sèche (LEMOALLE, 1979). Nous manquons d'images pour documenter la période sèche qui a suivi, mais les périodes sèches suivantes, en 1986 et 1987, montrent une zone humide réduite avec des eaux libres qui serpentent dans les zones les plus profondes du lac. Pendant la décennie 1975-1985, la localisation des eaux libres est très variable, disparaissant plus ou moins sous la végétation aquatique. La zone deltaïque est logiquement la plus



**Figure 10**  
*Variations interannuelles des eaux libres (en bleu)  
 et des marécages (en rouge) entre 1972 et 2015.*

marécageuse. Suite à la baisse du niveau de l'eau, de nombreuses îles sont dégagées. À l'étiage en 1985, un véhicule pouvait traverser le lac dans sa largeur.

L'année 1994 est une année pluviométrique exceptionnelle. À la station météorologique de Yao, on mesurait 650 mm après quinze années comprises entre 250 et 400 mm (fig. 3). Ces pluies abondantes sur l'ensemble du bassin versant se traduisent par un remplissage du lac beaucoup plus important, comme le montre l'image de janvier 1995. Les eaux s'étendent dans la cuvette jusqu'à l'ancienne ligne de rivage à la courbe bien marquée au nord du lac (fig. 1) et aux espaces interdunaires au sud-est, où la végétation aquatique s'installe. Les eaux parviennent également aux mares du nord-est à travers les chenaux. Les eaux libres toutefois restent peu étendues et toujours limitées aux parties les plus profondes du lac (fig. 10).

Entre 1972 et 1995, les eaux libres s'étendent sur moins de 100 km<sup>2</sup> (tabl. 4). Ce n'est qu'à partir de janvier 1998 qu'elles prennent l'extension qu'on leur

Tableau 4  
Surfaces d'eau libre et de zones marécageuses (km<sup>2</sup>).

Date de prise d'images	Eau libre	Marécages	Total
oct. 1972	106	370	476
févr. 1986	52	148	201
oct. 1986	56	342	398
mars 1987	57	140	196
oct. 1987	54	309	363
janv. 1995	79	556	635
déc. 1998	451	551	1 002
déc. 1999	585	530	1 115
févr. 2000	262	568	830
oct. 2000	188	351	539
nov. 2000	192	341	533
mai 2001	153	19	172
nov. 2002	293	480	773
avr. 2003	190	46	236
mai 2003	157	29	186
janv. 2006	204	104	308
sept. 2009	325	364	689
oct. 2011	187	607	794
oct. 2013	200	950	1 150
oct. 2014	239	1 078	1 317
oct. 2015	214	788	1 002

connaît actuellement, entre 200 et 350 km<sup>2</sup> entre octobre et février (fig. 10). Les deux images de décembre 1998 et 1999 fournissent les superficies d'eaux libres maximales, respectivement 540 et 585 km<sup>2</sup>, notamment en raison du remplissage des mares au nord-ouest : non inondées depuis de nombreuses années (près de trente ans d'après nos résultats), celles-ci se remplissent d'abord d'eau puis se végétalisent progressivement, fournissant les ressources exploitées depuis par la pêche et l'élevage. C'est aussi dans ce secteur qu'une magnifique doumeraie s'est développée, qui fournit les noix pour une filière rentable de combustibles vers N'Djamena (GUEDON, 2016).

Si l'on exclut les 3 images correspondant à l'étiage (mai 2001, avril et mai 2003), nous observons depuis le début des années 2000 une certaine stabilisation de la superficie du lac à un niveau nettement plus haut que celui des années sèches entre 1972 et 1995. Cette superficie reste très variable, avec des années sèches (2006) ou plus humides (2014).

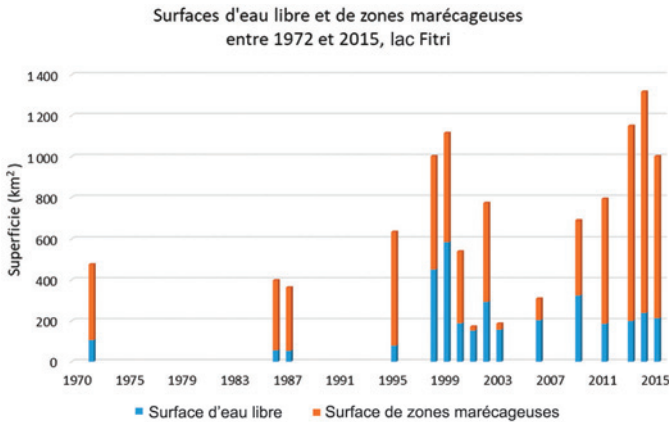
Les variations des superficies de la zone humide correspondent assez fidèlement à celles observées pour la pluviométrie à Yao (fig. 2). Les décalages s'expliquent par une pluviométrie plus importante dans d'autres secteurs du bassin versant : les années 1998 et 1999 n'apparaissent pas particulièrement pluvieuses à Yao mais sont caractérisées par une forte crue. La tendance de la pluviométrie annuelle est à l'augmentation à Yao depuis les années 1970 (fig. 3), ainsi que celle des données de l'échelle de crue de Yao (fig. 12). Nos résultats sur l'extension des crues du lac Fitri calculés par télédétection apparaissent donc cohérents avec ces tendances générales. Ils montrent une expansion de la zone humide qui a doublé depuis les années sèches de la décennie 1970.

Les données de hauteur d'eau à Yao confirment la stabilisation du niveau du lac depuis le début des années 2000. On observe également une réduction de sa variabilité interannuelle, particulièrement importante entre 1986 et 1996 (fig. 12). Le remplissage des mares au nord-ouest du lac semble avoir lieu lorsque la hauteur d'eau à Yao dépasse la cote 350.

## Une augmentation des ressources disponibles

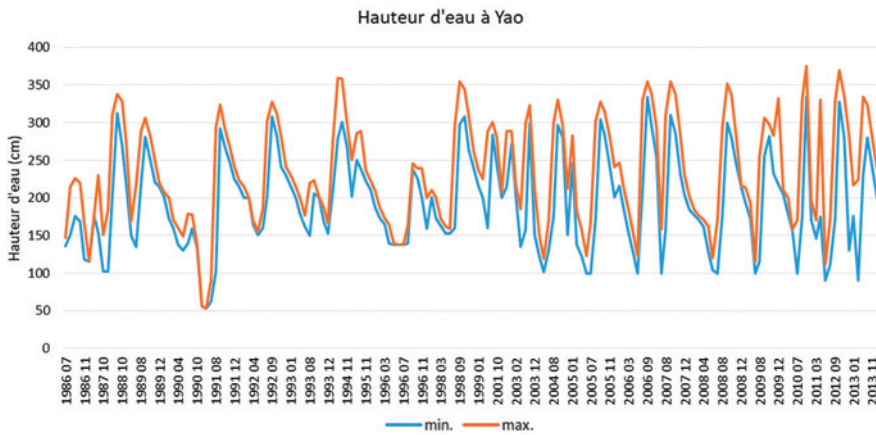
Comme le lac Tchad, qui après un stade « Petit lac sec » dans les années 1970 s'est stabilisé à un niveau « Petit lac » (MAGRIN *et al.*, 2015), le lac Fitri n'est pas dans une dynamique régressive. Nos résultats montrent que depuis les grandes sécheresses sahéliennes, le lac Fitri a retrouvé un régime hydrique plus important. Il est difficile de comparer nos chiffres d'estimation de la superficie du lac à celui évalué par J. LEMOALLE (1979) qui indique une superficie de 1 300 km<sup>2</sup> en 1970, car l'auteur ne précise pas s'il s'agit des





**Figure 11**

Variations des surfaces d'eau libre et de zones marécageuses de 1972 à 2015.



**Figure 12**

Hauteur d'eau en période de crue et d'étiage de 1986 à 2011 à Yao.

Sources : échelle de crue de Yao, Drem.

eaux libres seulement, auquel cas le lac aurait été beaucoup plus grand qu'aujourd'hui.

Les activités anthropiques – agriculture, élevage, pêche – pratiquées au lac Fitri pendant la saison sèche se localisent essentiellement dans la zone humide. Contrairement à la perception de dégradation des ressources, qui s'appuie sur le discours généralisé sur la désertification, mais aussi localement sur un constat de baisse des prises de poisson par pêcheur, de réduction de la taille des prises et de dégradation des ressources pastorales (MARTY *et al.*, 2012 ; BEGC, 2016), nous pouvons affirmer que les ressources apportées par la zone humide sont stabilisées et en extension depuis les années 1990.

Les eaux libres, où se pratique la pêche, sont aujourd'hui deux fois plus étendues que dans les années 1970-1980 (fig. 11). Elles ont recouvert la cuvette principale du lac qui était très végétalisée jusqu'à la moitié des années 1990, repoussant

la végétation marécageuse vers l'extérieur. L'augmentation de la production halieutique du lac est difficile à estimer, car elle dépend de l'association entre eaux libres et marécages, où se multiplient les espèces, grandissent les alevins et se nourrissent les adultes. L'absence de données ne permet pas de conclure à une baisse de la productivité.

Les surfaces marécageuses couvraient entre 300 et 400 km<sup>2</sup> dans les années 1970-1980, entre 600 et 900 km<sup>2</sup> pour les années 2011-2015 (l'année 2014, avec 1 000 km<sup>2</sup>, restant exceptionnelle pour la période récente ; tabl. 4). Elles comprennent des peuplements de *Echinochloa stagnina* et de *Phragmites* sp. sur les îles et en bordure d'eau, puis dans les zones inondées plus temporairement, des forêts d'*Acacia nilotica*. Leur localisation a fortement évolué depuis les années 1970-1980 (fig. 11). À partir de la moitié des années 1990, cette végétation s'étale pour coloniser l'ensemble de la cuvette principale du lac, les mares au nord-ouest et les espaces interdunaires du sud-ouest. Elle s'est ainsi déplacée de plusieurs centaines de mètres. Cette observation est confirmée par les agriculteurs de sorgho qui désignent l'emplacement des anciens champs.

Pour le lac Tchad, où l'on trouve le même type de pâturage aquatique avec une utilisation complémentaire des sous-produits de l'agriculture par le bétail, la capacité de charge animale théorique est estimée à 1 UBT/ha<sup>4</sup> pour du bétail restant douze mois sur place, 2 UBT/ha s'il ne reste que six mois (GUÉRIN *et al.*, 2014). Avec les mêmes chiffres, la capacité d'accueil serait au Fitri, pour du bétail restant six mois sur place, de 60 à 80 000 UBT dans les années 1970 et de 120 à 180 000 UBT<sup>5</sup> depuis le début des années 2000. Si la pression exercée par le bétail sur l'environnement du Fitri est de plus en plus perceptible au cours de la dernière décennie, marquée par un élagage des arbres appréciés par le bétail et la disparition du pâturage sec en quelques semaines après l'arrivée des troupeaux transhumants, la forte augmentation de la disponibilité fourragère a permis l'accueil de troupeaux plus nombreux, ainsi que leur temps de résidence saisonnier plus long dans le lac.

## Conclusion

Le suivi des extensions de la crue annuelle du lac Fitri depuis 1972 montre la difficulté de mesurer un lac peu profond : sa superficie varie d'un facteur 1 à 8 au cours d'une année (exemple de 2015), et elle double entre 1972 et 2015

4. UBT : Unité de bétail tropical correspondant à un bovin standard de 250 kg de poids vif ; les effectifs des bovins d'autres poids et des autres espèces sont évalués avec cette unité en appliquant des coefficients.

5. Ces chiffres théoriques sont à retenir pour leur tendance, car ils semblent très sous-estimés par rapport au cheptel recensé dans le Fitri : 800 000 bovins, 400 000 ovins et 750 000 caprins fréquentaient le Fitri entre 2007 et 2011 (MARTY *et al.*, 2012) pendant des saisons plus ou moins longues et en complément des ressources extérieures à la zone humide.

en ne considérant que les mois d'octobre. Cette situation rend la cartographie de cette région très difficile, ce dont témoigne la diversité des formes cartographiées pour ce lac depuis les années 1960 (carte IGN 1978 ; BIEP, 1989 ; BEGC, 2015 ; RAIMOND *et al.*, à paraître).

Nos résultats confirment les caractéristiques propres à un lac endoréique en zone semi-aride. L'ampleur de la crue dépend étroitement de la pluviométrie de son bassin versant situé exclusivement en zone sahélienne, puis de la forte évaporation liée aux températures élevées de la saison chaude. Les fluctuations des crues suivent assez bien le rythme d'années sèches et humides enregistré par le pluviomètre proche du lac (station de Yao). Contrairement au lac Tchad, avec lequel il est couramment comparé, le pic de crue du lac Fitri, en août et septembre, est presque concomitant avec celui de la pluviométrie locale, alors que le pic de crue du lac Tchad est lié à celui du Chari et intervient plus tard dans l'année, en novembre et décembre et plus tard encore dans la cuvette nord.

Nous montrons que les superficies des eaux libres et des marécages ont doublé depuis les sécheresses des années 1970-1990. Elles se sont stabilisées depuis le début des années 2000, et fournissent des ressources plus abondantes à une population humaine en forte croissance (la population a doublé entre 1989 et 2009, soient 110 400 habitants selon le recensement national de la population). Nos résultats contribuent à expliquer les chiffres obtenus par le récent recensement de l'élevage au Tchad, qui estiment que le bétail a doublé depuis 1976 (MINISTÈRE DE L'ÉLEVAGE, 2016). Si la pression anthropique est de plus en plus visible dans la région du Fitri, cette augmentation des populations humaines et animales a été rendue possible grâce à un « reverdissement » et un meilleur approvisionnement en eau du lac, conformément à ce qui est observé dans d'autres zones sahéliennes (DARDEL *et al.*, 2014). Un suivi régulier de la crue du lac Fitri, en plus de la pluviométrie, fournirait un excellent indicateur des tendances du climat dans cette région très peu étudiée, mais aussi des tensions sur les ressources dans le cadre de la croissance démographique.

## Bibliographie

### **BEGC, 2016**

*Étude diagnostique de la diversité biologique de la réserve de biosphère du lac Fitri.* République du Tchad, ministère de l'Environnement et des Pêches, FSE, 81 p.

### **BIEP, 1989**

*Étude de développement rural intégré du lac Fitri.* République du Tchad, ministère de l'Agriculture, Banque islamique

de développement, Cedrat-SA, Biep, document de synthèse et annexes, 61 p., multigr.

### **COHEN J., 1960**

A coefficient of agreement for nominal scales. *Education Psychology Measurement*, 20 : 37-46.

### **CONGALTON R. G., 1991**

A review assessing the accuracy of classifications of remotely sensed data. *Remote Sensing of Environment*, 37 : 35-46.

**COUREL M. F., BACHIMON P., RISER J., DAGOU P., MUSTAPHA M. A., RAIMOND C., 2005**  
*Géosystèmes lacustres, étude des régions des lacs Léré et Fitri, Tchad.* Ministère des Affaires étrangères, France, rapport scientifique, projet Campus 5 : 97 319 107, fac n° 99 002 600. Corus (MAE), 318 p.

**I. F. CREED, C. R. LANE, J. N. SERRAN, L. C. ALEXANDER, N. B. BASU, A. J. K. CALHOUN, J. R. CHRISTENSEN, M. J. COHEN, C. CRAFT, E. D'AMICO, E. DEKEYSER, L. FOWLER, H. E. GOLDEN, J. W. JAWITZ, P. KALLA, L. K. KIRKMAN, M. LANG, S. G. LEIBOWITZ, D. B. LEWIS, J. MARTON, D. L. McLAUGHLIN, H. RAANAN-KIPERWAS, M. C. RAINS, K. C. RAINS, L. SMITH, 2017**  
Enhancing protection for vulnerable waters. *Nature geoscience*, vol. 10 : 809-815. DOI: 10.1038/NGEO3041

**DARDEL C., KERGOAT L., HIERNAUX P., MOUGIN E., GRIPPA M., TUCKER C. J., 2014**  
Re-greening Sahel: 30 years of remote sensing data and field observations (Mali, Niger). *Remote Sensing of Environment*, 140 : 350-364.

**GARDNER R. C., BARCHIESI S., BELTRAME C., FINLAYSON C. M., GALEWSKI T., HARRISON I., PAGANINI M., PERENNOU C., PRITCHARD D. E., ROSENQVIST A., WALPOLE M., 2015**  
*State of the World's Wetlands and their Services to People: A compilation of recent analyses.* Gland, Switzerland, Ramsar Briefing Note, 7, 21 p.

**GUÉDON J., 2016**  
*Origine et évolution de la filière des noix de doum du Fitri : nécessité alimentaire et opportunité énergétique.* Master 1 de géographie, université Paris 1 Panthéon-Sorbonne, 152 p.

**GUÉRIN H., RÉOUNODJI F., RANGÉ C., 2014**  
« Les dynamiques d'élevage ». In : Lemoalle J., Magrin G., dir. : *Le développement du lac Tchad : situation actuelle et futurs possibles.* CBLT, N'Djamena, Marseille, Expertise collégiale IRD, AFD-FFEM, rapport de synthèse, 67 p. + traduction anglaise et contributions intégrales des experts (CD, 20 chapitres, 620 p.), 423-474.

**NIEL H., LEDUC C., DIEULIN C., 2005**  
Caractérisation de la variabilité spatiale et temporelle des précipitations annuelles sur le bassin du lac Tchad au cours du 20<sup>e</sup> siècle. *Hydrological Sciences Journal*, 50 : 2-243.

**LANDI J. R., KOCH G. G., 1977**  
The Measurement of Observer Agreement for Categorical Data. *Biometrics*, 33 : 159-174.

**LEBLANC M., FAVREAU G., MALEY J., NAZABOU Y., LEDUC C., STAGNITTI F., VAN OEVELEN P. J., DELCAUX F., LEMOALLE J., 2006**  
Reconstruction of Megalake Chad using february 2000 shuttle radar topographic mission data. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 239 : 16-27.

**LEBLANC M., LEMOALLE J., BADER J.-C., TWEED S., MOFOR L., 2011**  
Thermal remote sensing of water under flooded vegetation: New observations of inundation patterns for the "Small" Lake Chad. *Journal of Hydrology*, 404 : 87-98.

**LEMOALLE J., 1979**  
*Étude des potentialités du bassin conventionnel du lac Tchad. Hydrobiologie : Utilisation de la télédétection pour l'évaluation des surfaces inondées.* Paris, Orstom, 62 p.

**MADGWICK F. J., PEARCE F., 2017**  
*Water shocks. Wetlands and human migration in the Sahel.* Wetlands International, the Netherlands. <https://www.wetlands.org/publications/water-shocks-wetlands-humanmigration-sahel/>

**MAGRIN G., POURTIER R., LEMOALLE J., 2015**  
*Atlas du lac Tchad.* Paris, IRD Éditions/Passages, 225 p.

**MARTY A., ZAKINET D., KHAMIS D. D., BERNARD C., 2012**  
*Almy al Afia 2. Analyse de l'évolution des ressources dans le département du Fitri.* Document principal. République du Tchad, programme d'hydraulique pastorale au Tchad central, Phase II. Antea-Iram, 128 p.

**MINISTÈRE DE L'ÉLEVAGE, 2018**  
Recensement général de l'élevage (RGE 2012-2015). Principaux résultats définitifs. République du Tchad, 78 p.

**RAIMOND C., MBAGOGO A., MADJIGOTO R., ZAKINET D., à paraître**  
Repenser la gouvernance d'une zone humide autour d'un pouvoir local fort : l'exemple du lac Fitri (Tchad) face à la montée des insécurités. Colloque Méga-Tchad *Les insécurités dans le bassin du lac Tchad*, Nice, XVII<sup>e</sup> colloque Méga-Tchad, 14-16 juin 2017.

**SCHUSTER M., SYLVESTRE F., RAIMOND C.,  
MOUSSA A., ABAKAR Y., YALIKUN T.**  
« Changements environnementaux et climatiques  
à la période humide africaine Holocène  
dans le bassin du lac Fitri (Tchad) ». Ce volume.

**TOU J. T., GONZALEZ R. C., 1974**  
*Pattern Recognition Principles*. Addison-Wesley  
Publishing Company, Reading, Massachusetts,  
377 p.

Yalikun T., Raimond C., Kemsol Nagorngar A., Zakinet D., Schuster M., Sylvestre Florence.

Variabilité des crues et des paysages du lac Fitri depuis les grandes sécheresses des années 1970-1980.

In : Raimond C. (ed.), Sylvestre Florence (ed.), Zakinet D. (ed.), Moussa A. (ed.). Le Tchad des lacs : les zones humides sahéliennes au défi du changement global. Marseille : IRD, 2019, p. 99-119.

(Synthèses). ISBN 978-2-7099-2715-4