

Les lacs d'Ounianga

Mieux comprendre leur dynamique hydrologique et écologique par une approche interdisciplinaire

*Thijs VAN DER MEEREN, Pierre DESCHAMPS,
Florence SYLVESTRE, Baouyé KEMKONG,
Abderamane MOUSSA, Mathieu SCHUSTER,
Dirk VERSCHUREN*

Introduction

Les lacs d'Ounianga inscrits au patrimoine mondial de l'Unesco depuis 2012 sont situés dans le nord-est du Tchad. Ils abritent une grande diversité d'habitats aquatiques, sources, lacs et zones humides (voir fig. 1, page 16), ainsi qu'une salinité très contrastée, allant de l'eau douce à des eaux hypersalines (CNAR¹, 2011). Ces systèmes lacustres extrêmement rares présentent non seulement l'originalité d'être caractérisés par cette grande diversité d'habitats aquatiques mais aussi d'être concentrés sur une zone géographique bien définie au cœur du Sahara central. Ces lacs sont les reliques de lacs plus vastes et plus profonds, qui se sont développés au début de la période humide africaine (~10 000 ans) comme en témoignent de nombreux affleurements de dépôts lacustres. La transition vers les systèmes de lacs actuels n'est que partiellement comprise et a eu un impact profond sur les populations humaines de cette région par le biais des changements majeurs de ces lacs. Aujourd'hui, nous disposons de peu

1. Centre national d'appui à la recherche.

d'informations sur la variabilité naturelle à long terme pour déterminer et discuter de l'utilisation durable des services écosystémiques que fournissent ces lacs. Bien que l'impact environnemental des activités humaines dans les bassins d'Ounianga semble relativement modeste et localisé, étant données la grande fragilité des écosystèmes en zone aride et la rareté des ressources en eau douce dans le Sahara, les enjeux sont élevés.

La recherche interdisciplinaire, combinant les études limnologiques et écologiques des systèmes actuels avec des analyses paléolimnologiques, micropaléontologiques, géochimiques et paléohydrologiques sur les archives sédimentaires, améliore la compréhension de la dynamique de l'écosystème aquatique à long terme, notamment de l'impact du changement climatique sur les environnements et les sociétés. Les sédiments au fond des lacs enregistrent les changements environnementaux des lacs eux-mêmes et de leur bassin versant à des échelles de temps allant de l'année à plusieurs millénaires. Compte-tenu de la rareté des archives naturelles dans le Sahara (anneaux de croissance des arbres, dépôts de grotte par exemple), les sédiments lacustres des bassins d'Ounianga contiennent des informations paléoenvironnementales uniques. Les lacs se sont maintenus, malgré le fort déficit en humidité du climat désertique (*i.e.* une forte évaporation et pratiquement pas de pluie), par l'apport continu des eaux souterraines fossiles provenant de l'aquifère des grès de Nubie. Différents indicateurs contenus dans les sédiments lacustres fournissent des renseignements clés sur les changements passés : la limnologie (la profondeur des lacs, leur salinité, leur productivité aquatique), les processus terrestres (l'érosion, la couverture végétale, le flux de poussières) et le changement climatique (l'aridité relative, l'activité éolienne).

Cette contribution présente un certain nombre d'axes de recherche suivis par le programme Gelt afin d'améliorer la compréhension de la dynamique à long terme du fonctionnement de l'écosystème aquatique des lacs d'Ounianga, du contexte paléoclimatologique de la région et de l'histoire de son occupation humaine.

Caractérisation du fonctionnement limnologique

Connaître le fonctionnement limnologique des lacs et en particulier l'intensité de la fréquence du mélange de leur colonne d'eau permet de mieux comprendre les conséquences écologiques des perturbations passées et futures causées par le changement climatique et l'activité humaine. Par exemple, pendant la première moitié de l'Holocène où le lac Yoa était d'eau douce (KRÖPELIN *et al.*, 2008 ; EGGERMONT *et al.*, 2008), les conditions ont pu être plus favorables pour la vie benthique (FRANCUS *et al.*, 2013) du fait que les conditions d'eau douce auraient

favorisé le mélange et l'oxygénation de la colonne d'eau, en dépit de sa plus grande profondeur à l'époque. De plus, des perturbations équivalentes dans des contextes climatiques identiques mais avec des propriétés physiques différentes (taille, superficie) peuvent provoquer des réponses écologiques contrastées dans les lacs.

Lors des campagnes sur le terrain qui ont débuté à partir de 2003, des données sur les propriétés physiques et hydrochimiques ont été recueillies sur différents plans d'eau d'Ounianga. Compte tenu de l'éloignement du site et des conditions climatiques contraignantes, il est particulièrement difficile d'obtenir des données sur ces milieux et ainsi d'en comprendre les variations saisonnières. Jusqu'à présent, tous les travaux sur le terrain ont été réalisés au cours de la fenêtre temporelle la plus propice, c'est-à-dire entre les mois d'été chaud et les mois d'hiver froid et venteux de l'hémisphère nord, et ont laissé la plus grande partie de l'année sans observation *in situ*. Pourtant, le cycle saisonnier dans la région d'Ounianga est bien contrasté, avec des températures moyennes mensuelles allant de 15 °C en janvier à plus de 30 °C au mois de juillet (CAPOT-REY, 1961 ; FRANCUS *et al.*, 2013). Ces amplitudes de température sont renforcées par des changements également importants de l'intensité du vent.

Dans ce contexte, les enregistreurs automatiques de température de la colonne d'eau fournissent des renseignements clés sur le cycle saisonnier du mélange et de la stratification de la colonne d'eau des lacs à température contrôlée.

Les colonnes d'eau des lacs Yoa et Bokou, qui sont les lacs respectivement les plus profonds de Ounianga Kebir et de Ounianga Serir (fig. 1), ont été mesurées en automatique (enregistreur Vemco Minilog-II) à plusieurs profondeurs entre novembre 2010 et janvier 2012 (fig. 2). La température de l'eau à 5 m de profondeur, correspondant à la couche supérieure de l'eau (épilimnion) mélangée quotidiennement par le vent et les courants, a suivi les tendances moyennes mensuelles de la température de l'air, bien que l'eau se réchauffe et se refroidisse avec un léger retard par rapport à la température de l'air, en raison de sa capacité thermique élevée. La température de l'eau à proximité du fond, correspondant à la couche profonde plus froide (hypolimnion) mélangée une seule fois par an n'a pas varié en fonction de la température de l'air, mais reflète clairement le cycle annuel du mélange et de la stratification de la colonne d'eau.

En se basant sur la présence de conditions isothermes tout au long de la colonne d'eau (supérieure et inférieure), ces données révèlent que le mélange pendant la saison froide dans le lac Bokou s'est produit de façon continue de début octobre à janvier, et de façon intermittente jusqu'à début avril. Dans le lac Yoa, le mélange complet s'est produit de façon continue à partir du début du mois de novembre jusqu'à janvier (fig. 2). À compter de janvier, l'eau de surface se réchauffe. Cette situation crée un écart de température de plus en plus important (thermocline) entre la couche supérieure chaude (qui se mélange) et la couche inférieure froide (qui ne se mélange pas), même si le transfert de chaleur par diffusion à travers cette thermocline semble également provoquer un réchauffement progressif de la couche inférieure (fig. 2). Dans les deux lacs, la

stratification de température la plus prononcée (c'est-à-dire le contraste de température le plus important entre la surface et le fond) coïncide avec un réchauffement maximum en surface au mois de juillet. Le refroidissement des eaux de surface à partir de septembre, induite par la diminution de la température de l'air et l'augmentation du vent, réduit simultanément ce contraste de

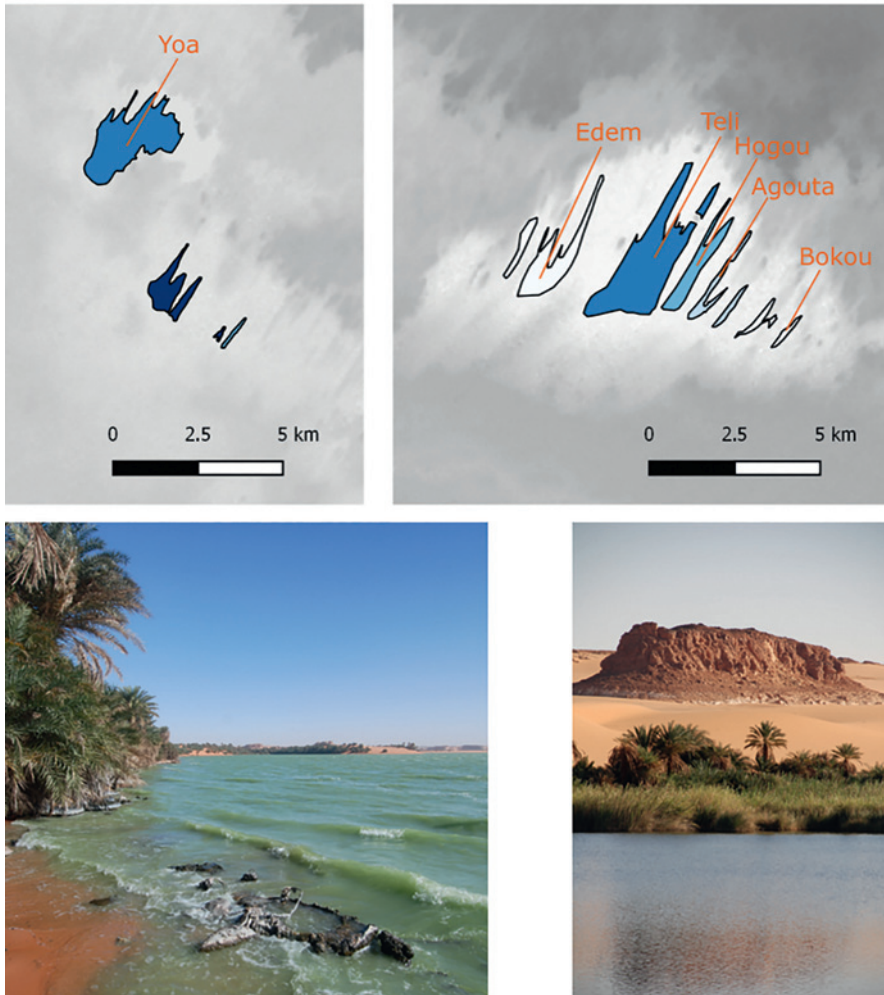


Figure 1

En haut : Carte de localisation des lacs à Ounianga Kebir (à gauche) et Serir (à droite), avec la topographie relative indiquée en niveaux de gris et la coloration des lacs représentant la gamme de salinité (du blanc pour les lacs d'eau douce au bleu foncé pour les lacs hypersalés), les noms des lacs mentionnés dans le texte sont indiqués ; les tapis de roseaux flottants (phragmites) pouvant couvrir partiellement les lacs d'eau douce ne sont pas représentés sur ces schémas. **En bas :** Photographies prises à partir de la rive ouest du lac Yoa (à gauche) et du lac Bokou (à droite), en regardant respectivement vers le nord-est et vers l'est.

température et diminue progressivement la thermocline jusqu'au début du mélange en saison froide. À cette période, la colonne d'eau redevient isotherme à toutes les profondeurs.

Pendant le mélange complet d'octobre (novembre) jusqu'en janvier, la température de l'eau diminue considérablement, respectivement de 25 à 15 °C dans le lac Bokou et de 21 à 13 °C dans le lac Yoa. Le fait que la stratification estivale dans ces lacs soit interrompue dès le milieu de l'automne, c'est-à-dire bien avant que les températures de l'air hivernales les plus basses soient atteintes, témoigne de l'importance du mélange turbulent induit par le vent, par rapport au mélange convectif induit par la température, en « relançant » le mélange saisonnier dans ces lacs. De plus, en raison d'une plus grande contrainte du vent à la surface du lac Yoa (5,1 km² par rapport à 0,2 km² pour le lac Bokou), les fluctuations de température quotidiennes pendant la saison de stratification sont beaucoup plus importantes à Yoa, pour des profondeurs d'eau données.

La durée saisonnière de la stratification et du mélange de la colonne d'eau peut avoir des répercussions considérables sur l'état écologique des lacs, principalement par son effet sur l'oxygénation de l'hypolimnion, et sur l'apport en éléments nutritifs pour le phytoplancton responsable de la productivité aquatique dans l'épilimnion. Cependant, les régimes de mélange saisonnier similaires peuvent donner lieu à des réactions biologiques très différentes dès lors que les lacs présentent des caractéristiques physiques et chimiques différentes (fig. 3). C'est le cas pour les lacs Bokou et Yoa. Le premier est un petit lac d'eau douce

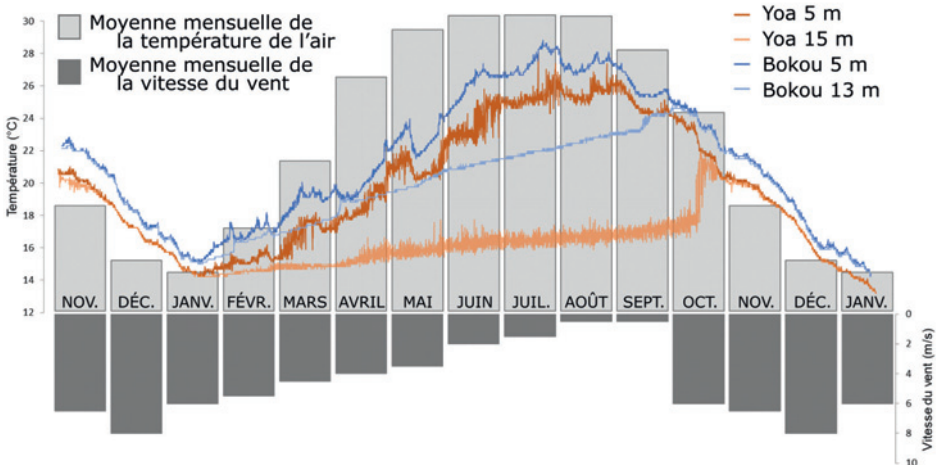


Figure 2

Série chronologique de la température de l'eau à des profondeurs données dans les lacs Yoa et Bokou (courbes, enregistreur automatique des températures toutes les deux heures) comparée aux moyennes mensuelles de la température de l'air mesurée entre 1970 et 2010 (barres gris clair, données de FRANCUS et al., 2013) et aux moyennes mensuelles de la vitesse du vent entre 1957 et 1996 (barres gris foncé sur l'axe inversé, données de WASHINGTON et al., 2006).

(320 $\mu\text{S}/\text{cm}$) peu productif, le second est un grand lac hypersalin (env. 70 000 $\mu\text{S}/\text{cm}$) plus productif. Les mesures de l'oxygène dissous de la colonne d'eau lors de la saison du mélange (décembre 2003 et janvier 2012) montrent que la colonne d'eau du lac Yoa est complètement anoxique pendant le premier mois de mélange, même si c'est le moment où l'oxygène atmosphérique dissous dans les eaux de surface pourrait potentiellement être injecté en profondeur dans la colonne d'eau.

Cette anoxie est une conséquence de la conjugaison de trois facteurs. Tout d'abord, le lac Yoa hypersalin permet que la concentration en oxygène dissous en équilibre avec l'atmosphère ne soit que d'environ 60 % de ce qu'elle serait en eau douce à des températures similaires. Deuxièmement, la densité spécifique élevée de cette eau salée (environ 1,055 g/ml, comparativement à 0,999 g/ml pour l'eau douce à température similaire) nécessite considérablement plus d'énergie pour qu'un mélange se fasse à une profondeur donnée. Enfin, la présence d'un grand volume d'eau de fond anoxique avec de fortes concentrations en éléments chimiques réduits l'emporte sur la couche d'eau superficielle relativement peu profonde qui est en contact direct avec l'atmosphère. Les odeurs de soufre autour du lac Yoa au cours (début) de la saison du mélange illustrent de manière significative les processus de réduction qui dominent les eaux de fond pendant environ neuf mois d'isolement de l'atmosphère. La demande élevée en oxygène des éléments chimiques (et des matières organiques en décomposition) dans ces eaux de fond prive temporairement la couche de

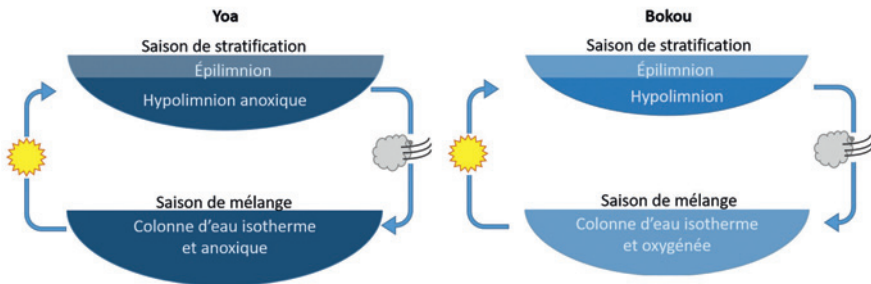


Figure 3

Modèle conceptuel de mélange saisonnier (eaux profondes et eaux de surface) dans un lac et implication sur les conditions écologiques en fonction des conditions morphologique et chimique différentes. Des conditions réduites et anoxiques dans la colonne d'eau inférieure volumineuse (hypolimnion) du lac Yoa salin, plus productif durant la stratification, privent l'eau de surface en oxygène pendant une partie de la saison de mélange, alors que l'hypolimnion du lac Bokou, dilué et moins productif, reste probablement oxygéné tout au long de l'année, ce qui n'appauvrit pas la surface de l'eau en oxygène au début du mélange. Dans ce système, l'augmentation de l'insolation de janvier jusqu'à juillet est le principal facteur favorisant la stratification des eaux du lac, tandis que les forts vents d'automne, alliés à la diminution de l'ensoleillement, jouent un rôle important dans la répartition de cette stratification. Les différences en termes de propriétés physiques y contribuent également : l'hypolimnion du lac Yoa est relativement plus important que celui du lac Bokou.

surface de tout oxygène pendant la majeure partie de la saison du mélange, sauf apparemment lors de sa phase finale lorsqu'un faible niveau d'oxygène dissous a été enregistré (données de janvier 2012). Cependant, ce peu d'oxygène ayant été injecté est consommé rapidement après le renouvellement du début de la stratification en février. Par conséquent, le fond du lac Yoa est certainement dénué de tous organismes benthiques qui pourraient causer la bioturbation des sédiments récemment déposés.

Dans le lac Bokou, au contraire, la colonne d'eau est complètement oxygénée pendant la saison de mélange. La dissolution de l'oxygène dans ce lac d'eau douce est optimale, et le mélange des couches plus profondes est plus efficace que dans le lac Yoa. Étant donné la nature moins productive du lac Bokou, beaucoup moins d'algues sédimentent vers l'hypolimnion, ce qui se traduit par une moindre demande en oxygène au cours du processus de décomposition. Enfin, en raison du volume relatif moins important de son hypolimnion, le mélange avec l'eau de surface affecte à peine les niveaux d'oxygène dans ce dernier. Ainsi, bien que les cycles de mélange saisonnier pour ces deux lacs soient très semblables (et tous deux clairement dépendants du climat), leur impact écologique est très différent. Le biote du lac Yoa est confronté à un tout autre environnement hydrochimique saisonnier (hypersalinité constante aggravée par l'anoxie complète pendant au moins un mois) que le biote du lac Bokou (eau douce en permanence, avec l'épilimnion oxygéné en permanence). Les données actuellement disponibles ne permettent pas de déterminer si l'oxygène hypolimnique dans le lac Bokou s'épuise au cours de la saison de stratification.

En complément de la caractérisation physique et hydrochimique des divers plans d'eau à Ounianga Serir et Ounianga Kebir, une série d'échantillons prélevés au filet a été recueillie contenant à la fois des organismes planctoniques et benthiques, et des échantillons de sédiments contenant à la fois des matières vivantes et subfossiles. En mettant l'accent sur ces groupes d'invertébrés aquatiques dont les restes sont bien préservés même dans les sédiments (*e.g.* les chironomes, les mollusques, les ostracodes, les cladocères), l'analyse de leur répartition entre les lacs permettra de mieux comprendre les exigences écologiques de chaque groupe et de chaque espèce, et donc de promouvoir l'interprétation paléoenvironnementale des assemblages fossiles déposés au cours de certaines périodes dans le passé.

Archives sédimentaires

Les lacs ont la capacité d'enregistrer fidèlement les changements climatiques et environnementaux dans leurs sédiments, mais seulement si cette archive naturelle est continue et non perturbée. La nature stratifiée fine et régulière (*e.g.* varves) des sédiments du lac Yoa (KRÖPELIN *et al.* 2008 ; FRANCUS *et al.*

2013) est la preuve de l'accumulation immédiate et continue non perturbée de sédiments fins dans ce lac au cours des 6 200 dernières années, démontrant à la fois sa stabilité hydrologique à long terme et les conditions anoxiques permanentes de son environnement en profondeur, tout au long de cette période. De tels enregistrements paléoenvironnementaux continus et avec une résolution annuelle sont probablement inégalés pour l'ensemble du Sahara. Pourtant, en raison de la taille et du fonctionnement hydrologique du lac Yoa, les signatures de certains événements climatiques passés peuvent être sur ou sous-accentuées dans ses enregistrements sédimentaires. Des carottages réalisés dans les lacs Edem, Teli et Agouta à Ounianga Serir fournissent désormais un moyen de comparer directement l'histoire environnementale de la fin de l'Holocène pour chaque lac, et ils pourront révéler des événements climatiques passés à l'échelle régionale qui n'auront peut-être pas été bien enregistrés dans les enregistrements sédimentaires du lac Yoa. En outre, les sédiments finement stratifiés du lac Teli, hypersalin (112 000 $\mu\text{S}/\text{cm}$), apportent une archive sédimentaire non perturbée et continue. La qualité de cet enregistrement est comparable à celle du lac Yoa sur au moins le dernier millénaire, bien que la profondeur du lac Teli n'excède pas 4,5 m (en 2016) contre 25 m dans le lac Yoa. Cela signifie que la salinité plus importante du lac Teli, et également probablement l'abri au vent du lieu de carottage dans la partie nord de ce lac, compensent sa faible profondeur : une plus forte densité de son eau hypersaline ($> 1,100 \text{ g}/\text{ml}$) permet d'éviter les turbulences dues au vent qui pourraient remettre en suspension ou perturber les sédiments accumulés. De même, toute forme de bioturbation est absente dans les sédiments récents du lac Teli, ce qui reflète une eau de fond anoxique en permanence. Comme attendu, les carottes de sédiments provenant du lac Edem (670 $\mu\text{S}/\text{cm}$) et du lac Agouta (1 780 $\mu\text{S}/\text{cm}$) bien plus dilués et mieux oxygénés ne montrent pas de stratifications fines sur ce même intervalle de temps, bien qu'elles aient été prélevées à des hauteurs d'eau identiques.

L'analyse des indicateurs sédimentologiques reflétant la composition et la texture de la masse de sédiments permet de déduire les variations de profondeur du lac, le régime de mélange et la chimie de l'eau. Les images obtenues par scanner tomographique (CT) à rayons X haute résolution donnent un aperçu de la texture et des gradients de densité des sédiments, et ce même sans ouvrir les carottes. Les variations de la susceptibilité magnétique fournissent des informations sur la nature et l'origine de la fraction minérale clastique arrivant au lac soit par le vent, soit par le ruissellement dans le bassin. L'analyse par la perte au feu (DEAN, 1974) permet de déterminer la teneur en eau, la porosité, et les constituants organiques et inorganiques. L'analyse de la granulométrie permet une estimation de la texture des sédiments.

De plus, les fossiles du biote aquatique sont conservés et utilisés comme des indicateurs biologiques pour déduire les changements passés en termes de répartition de l'habitat aquatique et d'hydrologie. Les mollusques fossiles, qui sont des indicateurs de substrats spécifiques, apparaissent en abondance dans les affleurements des dépôts lacustres du début de l'Holocène, à la fois dans les bassins de Kebir et de Serir (VAN BOXLAER *et al.*, 2011). Une analyse combinée

approfondie des assemblages des chironomidés et des diatomées récents et fossiles permet de procéder à des déductions quantitatives de la salinité du passé (e.g. KRÖPELIN *et al.*, 2008 ; EGGERMONT *et al.*, 2008). Enfin, l'analyse des ostracodes fossiles contribue aux reconstructions environnementales et paléohydrologiques à travers l'analyse de l'assemblage des espèces et de l'empreinte géochimique (analyse des isotopes stables) (e.g. VAN DER MEEREN *et al.*, 2011).

La connaissance du fonctionnement actuel du lac et une combinaison des données résultant des analyses sédimentologiques, paléoécologiques et géochimiques, améliorent la reconstitution fiable des changements environnementaux au cours du temps et du lien entre ces variations hydroclimatiques et les dynamiques des sociétés à l'échelle régionale.

Comprendre la dynamique écologique à long terme

Facteurs de changement

L'aquifère des grès de Nubie (ou NSAS pour Nubian Sandstone Aquifer System), qui a vraisemblablement été rechargé pour la dernière fois au milieu de l'Holocène (VOSS et SOLIMAN, 2014), alimente en permanence les lacs d'Ounianga Kebir et Serir en eau douce (env. 200 $\mu\text{S}/\text{cm}$). Faisant partie des plus grandes nappes aquifères au monde ($> 2\,000\,000\text{ km}^2$), il se compose d'un certain nombre de bassins interconnectés latéralement et verticalement en Égypte, en Libye, au Soudan et au Tchad (SALEM et PALLAS, 2004). En raison de sa forte connexion avec la décharge d'eau souterraine de l'aquifère NSAS, la réponse de l'équilibre hydrique à la variation du régime hydrologique climatique est supposée être relativement faible, sauf pour les échelles de temps les plus longues (i.e. Holocène et Quaternaire) (KRÖPELIN *et al.*, 2008 ; EGGERMONT *et al.*, 2008). Bien que l'analyse des enregistrements sédimentaires couvrant les derniers siècles des lacs Edem, Agouta et Hogou (CREUTZ *et al.*, 2016) semble indiquer que la sensibilité hydrologique de ces lacs désormais exclusivement alimentés par des eaux souterraines est certes relativement modeste, d'autres éléments suggèrent une certaine sensibilité au changement climatique à des échelles de temps relativement courtes.

D'un point de vue hydrogéologique, les bassins d'Ounianga sont situés à proximité de la marge de l'aquifère des grès de Nubie et sont relativement proches des anciennes régions d'alimentation à haute altitude telles que les imposants reliefs volcaniques du Tibesti, résultant des voies d'écoulement des eaux souterraines relativement courtes (VOSS et SOLIMAN, 2014). Au niveau de

cette situation périphérique, l'étendue verticale de l'aquifère est également beaucoup plus limitée que dans les zones à basse altitude situées au nord, où le temps de déplacement avant la décharge des eaux souterraines à la surface peut être beaucoup plus long (supérieur à 1 million d'années ; VOSS et SOLIMAN, 2014). Les connexions locales d'eau souterraine entre les lacs peuvent amplifier la concentration par évaporation, ce qui constitue une deuxième raison importante selon laquelle les lacs d'Ounianga peuvent présenter une sensibilité hydrologique plus importante que prévue.

Dans les deux bassins d'Ounianga, il existe un écoulement souterrain (entrée et sortie) entre les lacs, ce qui se traduit par des équilibres hydriques contrastés contrôlés de manière distincte par l'évaporation et la décharge des eaux souterraines. À l'échelle locale, il en résulte une amplification des changements de l'humidité au cours du temps. Dans le bassin de Serir, ce mécanisme est bien exprimé dans la partie centrale du lac hypersalin Teli qui est aligné à une série de lacs plus dilués (GEORGE, 1999 ; VAN BOCXLAER *et al.*, 2011 ; CREUTZ *et al.*, 2016). Une troisième raison pour laquelle la sensibilité à la variabilité hydrique liée au climat ne peut pas être négligeable est la variation saisonnière des niveaux d'eau des lacs à Ounianga (CAPOT-REY, 1961) : on ne s'attendrait pas à une telle variabilité si les lacs reflétaient simplement le niveau d'un grand réservoir d'eaux souterraines fossiles, sans surimposition climatique locale contemporaine. Quelques preuves de cette surimposition climatique peuvent également être trouvées dans la subtile mais notable augmentation du niveau du lac Teli entre 1984 et 2016, observée par images satellite Landsat (USGS/Nasa).

La résilience et les services écosystémiques

Bien que la grande incertitude des résultats des modélisations du climat pour l'Afrique (*e.g.* ROWELL *et al.*, 2016) interdise une prévision climatique claire pour de nombreuses régions, les précipitations moyennes pour la plupart des régions arides subtropicales et aux latitudes tempérées comme le Sahara central devraient diminuer (IPCC, 2014). Tandis que la performance des modèles climatiques s'améliore constamment, par exemple par une meilleure intégration des retours en termes de surface terrestre et de végétation-climat, la fiabilité des projections climatiques régionales pour le nord du Tchad va également probablement augmenter. Toutefois, une grande partie de l'adaptation de la région au changement climatique et de son adéquation avec les politiques de gestion des ressources naturelles dépend largement de la bonne compréhension de la dynamique de ces écosystèmes terrestres et aquatiques. Sans connaissances suffisantes de la sensibilité climatique à long terme des ressources des eaux de surface, des projections climatiques régionales, même très précises, laisseraient les décideurs dans le doute quant à la politique appropriée à adopter.

Pour la douzaine de lacs, les sources et les habitats des zones humides associés dans la région d'Ounianga, les connaissances actuelles sur la résilience écologique à long terme et la sensibilité du climat sont en grande partie limitées au lac Yoa, le plus profond et le plus volumineux d'entre eux, et donc aussi le

moins sensible à la variabilité du régime hydrique liée au climat. Certaines informations sont disponibles pour les lacs Edem, Agouta et Hogou dans le bassin de Serir (CREUTZ *et al.*, 2016), mais elles sont pour le moment limitées aux derniers siècles. Sur la base des informations actuellement disponibles, il est très difficile de tirer des conclusions sur la résilience des écosystèmes aquatiques de l'ensemble des lacs à l'échelle des siècles ou des millénaires. En l'état, nous ne disposons pas des éléments nécessaires sur la variabilité naturelle à long terme pour déterminer et discuter de l'utilisation durable des services écosystémiques que fournissent ces lacs.

Les lacs sahariens d'Ounianga représentent un patrimoine naturel et culturel unique, reconnu au patrimoine mondial de l'Unesco. Les populations ont utilisé ces territoires comme habitat temporaire ou permanent depuis de nombreux millénaires. L'art rupestre montrant des mammifères qui sont aujourd'hui localement éteints, les villages abandonnés sur les falaises escarpées bordant les lacs Yoa et Teli, les vestiges anciens de structures d'habitat, tous illustrent les changements importants en termes de climat, d'environnement et de culture auxquels cette région désertique a dû faire face au cours du temps. Une meilleure compréhension de l'histoire environnementale et de la résilience écologique de ces lacs peut aider à mieux se préparer aux changements globaux qui sont à venir.

Remerciements

Nous remercions le gouvernement du Tchad et son Centre national de recherche pour le développement pour l'autorisation des recherches, et le programme Gelt pour l'organisation interdisciplinaire des travaux sur le terrain en 2015 et 2016. Nous remercions l'administration locale d'Ounianga Kebir et d'Ounianga Serir pour le soutien apporté à ces missions. Nous remercions également la National Geographic Society (USA) pour le soutien financier aux travaux conduits sur le terrain en 2016 grâce à la subvention NGEF186-16 attribuée à Thijs Van der Meeren.

Bibliographie

CAPOT-REY R., 1961

Borkou et Ounianga. Étude de géographie régionale. Alger, université d'Alger (Institut de recherches sahariennes), vol. 5, 182 p.

CNAR, 2011

Proposition d'inscription des lacs d'Ounianga sur la Liste du patrimoine mondial, N'Djamena, 327 p., multigr.

**CREUTZ M., VAN BOCXLAER B.,
ABDERAMANE M., VERSCHUREN D., 2016**
Recent environmental history of the desert oasis lakes at Ounianga Serir, Chad. *Journal of Paleolimnology*, 55: 167-183.

DEAN W. E. J., 1974

Determination of carbonate and organic matter in calcareous sediments and sedimentary rocks by loss on ignition: comparison with other methods. *J Sediment Petrol*, 44: 242-248.

**EGGERMONT H., VERSCHUREN D., FAGOT M.,
RUMES B., VAN BOCXLAER B., KRÖPELIN S.,
2008**

Aquatic community response in a groundwater-fed desert lake to Holocene desiccation of the Sahara. *Quaternary Science Reviews*, 27: 2411-2425.

**FRANCUS P., VON SUCHODOLETZ H., DIETZE M.,
DONNER R. V., BOUCHARD F., ROY A. J.,
FAGOT M., VERSCHUREN D., KRÖPELIN S., 2013**
Varved sediments of Lake Yoa (Ounianga Kebir, Chad) reveal progressive drying of the Sahara during the last 6 100 years. *Sedimentology*, 60: 911-934.

GEORGE U., 1999

Entdeckungen im Herzen der Leere. *Geo*, 10: 20-50.

**IPCC (éd. PACHAURI R. K. and MEYER L. A.),
2014**

Climate Change 2014: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Geneva, IPCC, 151 p.

**KRÖPELIN S., VERSCHUREN D., LEZINE A. M.,
EGGERMONT H., COCQUYT C., FRANCUS P.,**

**CAZET J. P., FAGOT M., RUMES B.,
RUSSELL J. M., DARIUS F., CONLEY D. J.,
SCHUSTER M., VON SUCHODOLETZ H.,
ENGSTROM D. R., 2008**

Climate-driven ecosystem succession in the Sahara: The past 6 000 years. *Science*, 320: 765-768.

**ROWELL D. P., SENIOR C. A., VELLINGA M.,
GRAHAM R. J., 2016**

Can climate projection uncertainty be constrained over Africa using metrics of contemporary performance? *Climatic Change*, 134: 621-633.

SALEM O., PALLAS P., 2004

« The Nubian Sandstone Aquifer System (NSAS) ». In : Appelgren B., éd.: *Managing shared aquifer resources in Africa*, Paris, Unesco (ISARM-Africa; Series on Groundwater n° 8), 238 p.

**VAN BOCXLAER B., VERSCHUREN D.,
SCHETTLER G., KRÖPELIN S., 2011**

Modern and early Holocene mollusc fauna of the Ounianga lakes (northern Chad): implications for the palaeohydrology of the central Sahara. *Journal of Quaternary Science*, 26: 433-447.

**VAN DER MEEREN T., ITO E., VERSCHUREN D.,
ALMENDINGER J. E., MARTENS K., 2011**

Valve chemistry of *Limnocythere inopinata* (Ostracoda) in a cold arid environment – Implications for paleolimnological interpretation. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 306: 116-126.

VOSS C. I., SOLIMAN S. M., 2014

The transboundary non-renewable Nubian Aquifer System of Chad, Egypt, Libya and Sudan: classical groundwater questions and parsimonious hydrogeologic analysis and modeling. *Hydrogeology Journal*, 22: 441-468.

**WASHINGTON R., TODD M. C.,
ENGELSTAEDTER S., MBAINAYEL S.,
MITCHELL F., 2006**

Dust and the low-level circulation over the Bodélé Depression, Chad: Observations from BoDEx 2005. *J. Geophys. Res.*, 111 (D03): doi:10.1029/2005JD006502

Van Der Meeren T., Deschamps Pierre, Sylvestre Florence, Kemkong B., Moussa A., Schuster M., Verschuren D.

Les lacs d'Ounianga : mieux comprendre leur dynamique hydrologique et écologique par une approche interdisciplinaire.

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. 127-138.

(Synthèses). ISBN 978-2-7099-2715-4