

UTILISATION DE L'IMAGERIE RADAR (SENTINEL 1 ET 3) POUR LA SURVEILLANCE DU LAC D'AYAMÉ DANS LE SUD-EST DE LA CÔTE D'IVOIRE

Télesphore Y. BROU¹, Dabissi NOUFE², Dominique DUMAS³, Sylvain BIGOT⁴, Pauline DIBI-ANOH⁵

¹ UR-Université de La Réunion, Laboratoire OIES, Océan Indien : Espace et Sociétés, 97744 Saint-Denis, France (telesphore.brou@univ-reunion.fr)

² UNA- Université Nangui Abrogoua, Laboratoire Géosciences & Environnement (LGE), 02 BP 801 - Abidjan 02, Côte d'Ivoire (dnoufe@hotmail.com)

³ Université Lyon 3 – Environnement Ville Société (EVS), UMR 5600, 69362 Lyon, France (dominique.dumas@univ-lyon3.fr)

⁴ UGA - Institut des Géosciences de l'Environnement (IGE), UMR 5001, 38000 Grenoble, France (sylvain.bigot@univ-grenoble-alpes.fr)

⁵ UFHB- Université Félix Houphouët Boigny, IGT, BP 744 Abidjan 01, Côte d'Ivoire (line237@yahoo.com)

Résumé : Dans le contexte actuel du changement climatique, le suivi des stocks en eau représente un enjeu majeur pour le développement agricole et la production hydroélectrique. L'objectif de ce travail est de montrer comment l'utilisation de l'imagerie spatiale (Sentinel 1 et 3) peut contribuer au suivi régulier d'un lac comme celui d'Ayamé, au sud-est de la Côte d'Ivoire, important pour ses multiples fonctions et par ailleurs peu documenté par des mesures *in situ*. Les séries temporelles sur les surfaces en eau extraites de la collection d'images Sentinel-1 et sur les hauteurs d'eau issues de Sentinel-3, fournies par le programme THEIA, ont été comparées avec les cotes d'eau *in situ* pour montrer l'intérêt et la complémentarité d'utiliser ces données spatiales pour la surveillance du lac d'Ayamé.

Mots-Clés : hydroclimatologie, eaux de surface, image radar, sud-est de la Côte d'Ivoire

Use of Radar imagery (Sentinel 1 and 3) for monitoring the lake of Ayamé in the south-east of Côte d'Ivoire

In the current context of climate change, the monitoring of water stocks represents a major issue for agricultural development and hydroelectric production. The objective of this work is to show how the use of spatial imagery (Sentinel 1 and 3) can contribute to the regular monitoring of a lake such as the one of Ayamé in the south-east of Côte d'Ivoire, which is important for its multiple functions and is poorly documented by *in situ* measurements. The time series of water surfaces extracted from the Sentinel-1 image collection and the water level from Sentinel-3, provided by the THEIA program, were compared with *in-situ* water levels to show the interest and complementarity of using these spatial data for the monitoring of Lake Ayamé.

Keywords : hydroclimatology, surface water, radar image, southeast Ivory Coast

Introduction et contexte

Dans le contexte actuel du changement climatique, la surveillance des ressources en eau représente un enjeu majeur pour le développement agricole et la production hydroélectrique notamment. En effet, 70% de l'eau douce terrestre dans le monde est utilisée pour l'agriculture et 15% pour l'hydroélectricité (FAO, 2021). L'évaluation et le suivi des ressources en eau se font au moyen des données *in situ*, de la modélisation hydrologique et des données satellitaires. Mais, devant la diminution du nombre de stations de jaugeage à travers le monde et les difficultés de plus en plus grandes à modéliser les réserves en eau à partir de ces données, les mesures satellitaires sont devenues un recours de plus en plus important (Frappart *et al.*, 2014).

Plusieurs satellites permettent de fournir des données d'observation des surfaces d'eau terrestres. La production de données sur les surfaces en eau est possible à partir des images optiques (par exemple, SPOT, Sentinel-1, Landsat, MODIS) et radar (par exemple, Sentinel-1, ENVISAT) particulièrement utiles pour produire des séries temporelles saisonnières sur les surfaces en eau et les zones inondées (Cazal *et al.*, 2016). De plus, les satellites d'altimétrie radar dont CryoSat-2, ENVISAT et Sentinel-3 permettent de produire des

données sur les hauteurs d'eau des lacs et cours d'eau. L'exploitation des données issues des données d'altimétrie de ces trois satellites dans le cadre du programme THEIA a permis la mise en place de la plateforme opérationnelle « Hydroweb » permettant de produire des séries temporelles actualisées de variations saisonnières des niveaux d'eau des cours d'eau et lacs à partir de station virtuelle (<https://hydroweb.theia-land.fr/>). Les données des stations virtuelles d'Hydroweb ont été produites pour les lacs et cours d'eau pour lesquels des données de validation ont été fournies d'une part et traversées par les traces des satellites d'autre part. La plateforme couvre dans le monde 112 grands lacs et 1212 points de mesures sur une vingtaine de grands fleuves, validés à partir des données *in situ* (THEIA, 2021).

Bien que traversés par les traces du satellite Sentinel-3, le bassin versant de la Bia et le lac d'Ayamé (figure 1a) ne font pas partie des sites concernés pour la production des données de la plateforme Hydroweb, les données de validation n'étant pas disponibles. Dans le cadre de ce travail, une série de données journalières des cotes d'eau mesurées au lac d'Ayamé a été mise à notre disposition par la CIE (Compagnie Ivoirienne d'Electricité), ce qui nous a permis de valider pour le lac d'Ayamé les mesures de hauteurs d'eau fournies (tous les 27 jours) par le satellite Sentinel-3B.

Situé en aval du bassin versant de la rivière Bia, en partage avec le Ghana voisin, le lac d'Ayamé est alimenté par les eaux de pluie (figure 1a). La recharge se fait pendant la saison pluvieuse de juin à octobre, le niveau d'eau maximum étant atteint en novembre avec une hauteur de 89,5 m en moyenne sur la période 2004-2020 (figure 1b). Le niveau le plus bas est atteint généralement en avril avec une hauteur de 85,7 m en moyenne sur la période 2004-2020 (figure 1b). Mais, certaines années, le niveau le plus bas peut atteindre des seuils critiques (en dessous de 84 m), comme en avril 2001 (photo 1) entraînant l'arrêt des turbines (CIE, 2021).

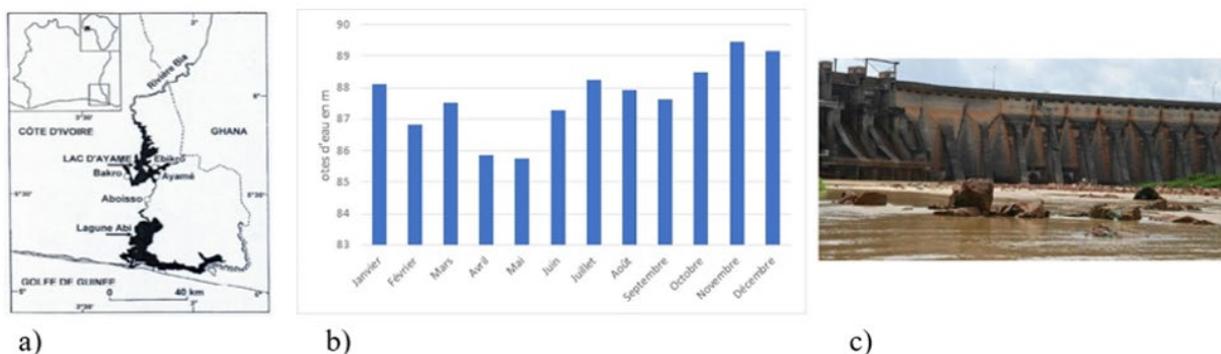


figure 1. a) Localisation de la zone d'étude (Ouattara et al., 2007). b) Cotes d'eau mensuelles moyennes au lac d'Ayamé sur la période 2004-2020 (sources : données de la CIE). c) Photo 1: CIE (4 mai 2021). Le niveau du lac est exceptionnellement bas et ne permet plus de faire tourner les turbines pour la production d'électricité

Le lac d'Ayamé est particulièrement important pour ses multiples usages. Liée en effet à la création d'un barrage en 1959, sa fonction principale est la production d'électricité. La capacité totale de fourniture d'électricité est d'environ 879 MW (CIE, 2021). Le lac est également une source importante de production halieutique. Par exemple, en moyenne 1000 tonnes par an de poissons y ont été pêchées entre 1998 et 2010 (Vanga, 2011). Une agriculture maraîchère est également pratiquée sur les marges (berges) du lac.

La connaissance et la surveillance de cet hydrosystème représentent donc un enjeu majeur pour le développement socio-économique de ce territoire et de la Côte d'Ivoire. Ce suivi nécessite de déterminer régulièrement les volumes d'eau stockés dans le lac et les plaines d'inondation. Le calcul du volume d'eau implique de connaître les surfaces en eau actualisées de la retenue d'eau. Or cette donnée est difficile à mesurer sur le terrain. Elle est estimée manuellement en suivant la courbe reliant la hauteur et le volume au moment de la mise en eau du barrage (Frappart *et al.*, 2014). Cette relation peut changer dans le temps avec le comblement ou l'envasement du fond de la retenue. Des techniques combinant observations satellitaires de la hauteur, de la surface et des relevés *in situ* ont permis de déterminer les volumes et variations de volumes d'eau dans des grands lacs et des grands bassins fluviaux (Frappart *et al.*, 2014).

L'objectif de ce travail est de montrer comment l'utilisation de l'imagerie spatiale (Sentinel 1 et 3) peut contribuer au suivi régulier du lac d'Ayamé dans un contexte de manque de données *in situ*.

1. Données et méthodes

1.1. Données

Trois types de données sont utilisées dans ce travail.

- La collection d'images Sentinel-1 de l'Agence Spatiale Européenne - Copernicus, accessible sur la plateforme Google Earth Engine (<http://earthengine.google.com>). Un script permet de récupérer automatiquement l'ensemble de la série temporelle (disponible depuis 2016) en y intégrant des filtres : date (2016-2021), zone d'étude, polarisation (VV). Cette mise à disposition automatique des images représente un gain en temps très important dans la mesure où cela nous dispense des processus classiques de téléchargement. Au total, 276 images sont mobilisées dans cette étude. Par ailleurs, les images radar sont particulièrement bien adaptées à l'observation saisonnière des surfaces en eau dans les milieux tropicaux car le signal radar s'affranchit de la nébulosité qui constitue au contraire une limitation majeure de l'utilisation des images optiques dans ces milieux (Cazal *et al.*, 2016).

- Les données de hauteurs d'eau estimées par altimétrie radar du satellite Sentinel-3B (capteur SRAL) de 2018 à 2021. La répétitivité de ce satellite est de 27 jours. Le jeu de données utilisé a été produit par l'équipe projet du programme THEIA. Les données ont été produites en tenant compte du biais systématique de 78 cm lié à la différence de la référence du point zéro entre l'observation *in situ* et celle du satellite (THEIA, 2021).

- Les mesures *in situ* de cote d'eau au lac d'Ayamé, en données journalières de 2004 à 2021, ont été fournies par la CIE (Compagnie Ivoirienne d'Electricité).

1.2. Méthodes

Pour analyser la variabilité hydroclimatique du lac d'Ayamé, nous avons calculé deux indices mensuels standardisés, l'un sur les hauteurs d'eau, l'autre sur la pluviométrie, en suivant la méthode de Nicholson (Servat *et al.*, 1997) : $(x_i - m)/s$ où x_i = hauteur du mois i ; m = moyenne du mois sur la période d'observation ; s = écart-type du mois sur la période d'observation.

La détection et la production de données sur les surfaces en eau reposent sur les outils de traitement d'images implémentés dans Google Earth Engine. Dans un premier temps, un script permet de détecter les pixels en eau sur chaque image de la série temporelle en leur appliquant un masque. En télédétection radar, les valeurs de pixels les plus faibles sur une image correspondent à celles de l'eau. La valeur seuil pour isoler les pixels en eau est de -16 sur la collection d'images Sentinel-1 utilisée (par comparaison, les pixels des zones urbaines ont des valeurs supérieures à 23). Ainsi, en dessous de -16, seules les formes des eaux de surface apparaissent sur l'image. Dans un deuxième temps, le script permet de calculer le nombre de pixels-eau par image de la zone étudiée et de fournir ainsi une série temporelle submensuelle sur les surfaces en eau de 2016 à 2021 (figure 2).

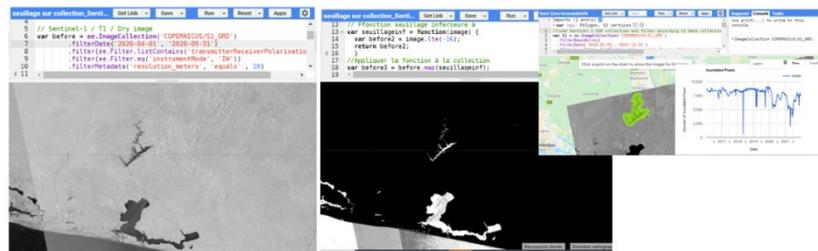


figure 2. Étapes du traitement d'images automatique sur la plateforme Google Earth Engine

Pour évaluer la validité des données de hauteurs issues du capteur Sentinel-3B pour le lac d'Ayamé, nous les avons comparées avec les données *in situ* à partir d'un modèle de régression linéaire. La droite de régression a été représentée ainsi que le graphique des valeurs observées et des valeurs estimées par imagerie.

2. Résultats

2.1. Variabilité spatio-temporelle saisonnière des hauteurs d'eau mesurée au lac et les surfaces à partir des données *in situ*

Le niveau du lac est modulé naturellement par la variabilité des précipitations mais aussi par des lâchers d'eau effectués dans le cadre de la gestion du barrage. En effet, pour éviter des inondations ou des débordements d'eau de la retenue, des lâchers sont effectués durant les mois très exceptionnellement pluvieux. Les mois exceptionnellement humides ne sont donc pas systématiquement accompagnés d'une augmentation conséquente du niveau du lac. Par exemple, l'année 2006, bien qu'ayant enregistré une pluviométrie excédentaire de janvier à avril, a été marquée par un niveau du lac exceptionnellement bas par rapport à la moyenne de la période d'observation (figure 3).

En revanche, les mois à pluviométrie déficitaire affectent systématiquement la disponibilité en eau du lac. La figure 3 montre que le lac a connu à plusieurs reprises des niveaux d'eau déficitaires consécutifs à des déficits pluviométriques. La sécheresse de l'année 2021 a été l'une des plus marquantes. Au cours de cette année-là, la cote d'eau enregistrée au mois d'avril était à peine de 84 m, entraînant l'arrêt de la fourniture d'électricité (CIE, 2021).

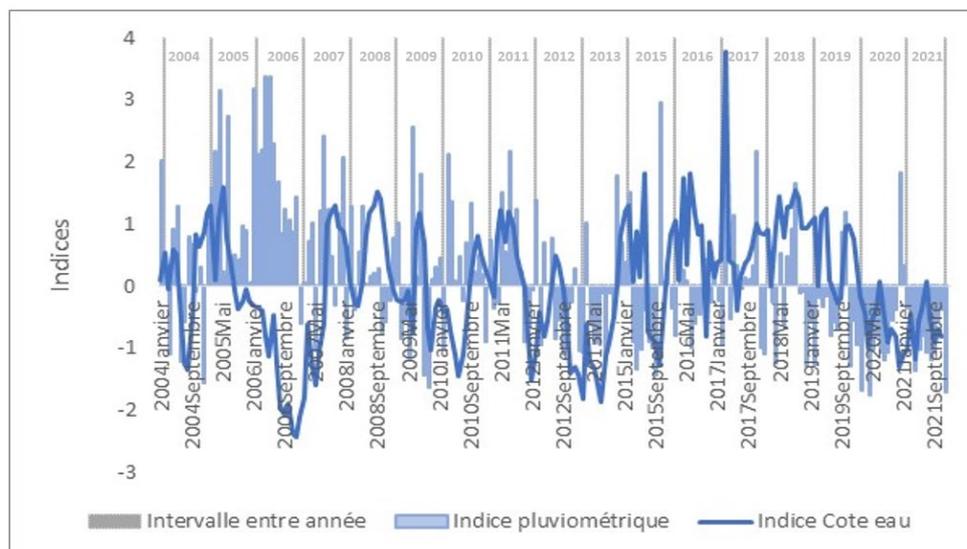


figure 3. Variabilité des anomalies standardisées de la pluviométrie et des cotes d'eau mensuelles mesurées au lac de 2004 à 2021 (source : données CIE)

2.2. Analyse de la variabilité spatio-temporelle saisonnière du lac à partir des surfaces en eau détectées par l'imagerie Sentinel-1 en comparaison avec les hauteurs d'eau mesurées au lac

Aucune mesure ou estimation de surface en eau n'est faite au lac d'Ayamé. Or cette donnée peut être utilisée en complément des hauteurs d'eau pour caractériser la variabilité spatio-temporelle du lac d'une part et pour calculer les stocks d'eau de la retenue d'autre part.

La figure 4 montre les variations saisonnières conjointes des surfaces en eau détectées par l'imagerie Sentinel-1 et les hauteurs d'eau mesurées au lac. Les périodes sèches (avril-mai) et celles humides (septembre-novembre) apparaissent clairement sur les deux courbes. Les sécheresses de 2020 et 2021 marquées par la baisse importante du niveau d'eau entre février et juillet s'est accompagnée d'une forte réduction de la surface en eau. Au cours des autres années, la baisse du niveau d'eau en saison sèche n'a pas entraîné une réduction conséquente de la surface en eau du lac. Contrairement aux années 2020 et 2021 où les cotes d'eau sont descendues en dessous de 85 mètres (valeurs critiques jamais atteintes au cours des 20 dernières années), celles-ci se sont maintenues au-dessus de 85 mètres durant les autres années. Ce qui a pour effet de limiter la rétractation de l'étendue du lac et l'apparition de zones sèches en son sein durant ces années.

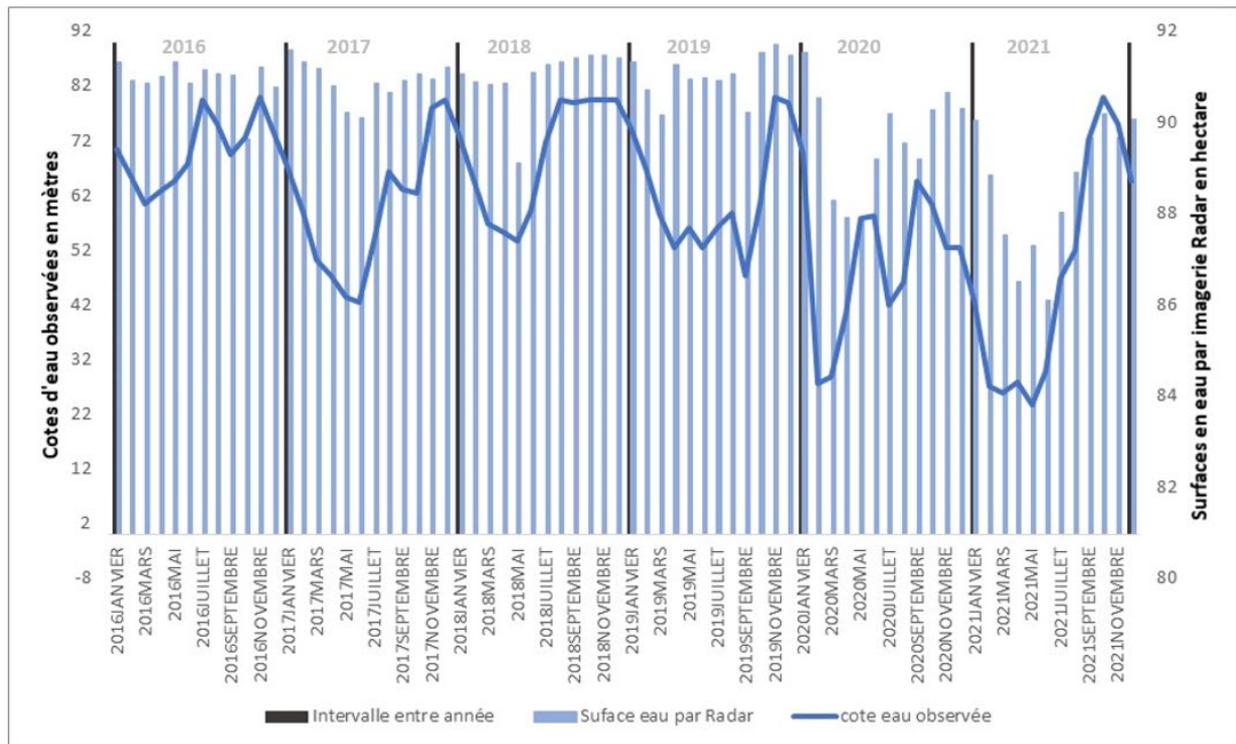


figure 4. Variabilité saisonnière des surfaces en eau détectées par imagerie Radar de 2020 à 2021

2.3. Analyse de la variabilité saisonnière interannuelle à partir des données d'altimétrie radar (Sentinel-3B) en comparaison avec les cotes d'eau mesurées au lac d'Ayamé

Sur la période allant de décembre 2018 à avril 2021, nous avons comparé le jeu de données des hauteurs d'eau de Sentinel-3B (une donnée tous les 27 jours) fournies par le programme THEIA et celui des mesures *in situ* au lac d'Ayamé. Dans cette analyse, nous n'avons pas utilisé les données de la période allant de mai à décembre 2021 à cause d'une forte divergence constatée avec les données au sol. Une hypothèse pourrait être que la période de mai à septembre 2021 ayant été très sèche au point de faire apparaître des zones de sols nus (bâches) dans le lac, la trace du satellite pourrait être passée sur une zone asséchée mais qui reste assez réfléchissante et la mesure durant cette période serait donc celle du sol.

Les figures 5a et 5b mettent clairement en évidence la covariation entre les cotes d'eau *in situ* et les hauteurs d'eau mesurées par satellite. Cette dernière reproduit très bien l'ensemble des variations saisonnières et interannuelles observées *in situ*, notamment la sécheresse de mars-avril 2021 (figure 5a). Les écarts observés sont faibles. Elles ne dépassent pas 13 cm. La droite de régression linéaire (figure 5b) montre une très forte corrélation proche de 1 (0,9965). Ces résultats sont comparables à ceux observés dans d'autres études de validation des données d'estimation de hauteurs d'eau par le satellite Sentinel-3 (THEIA, 2021).

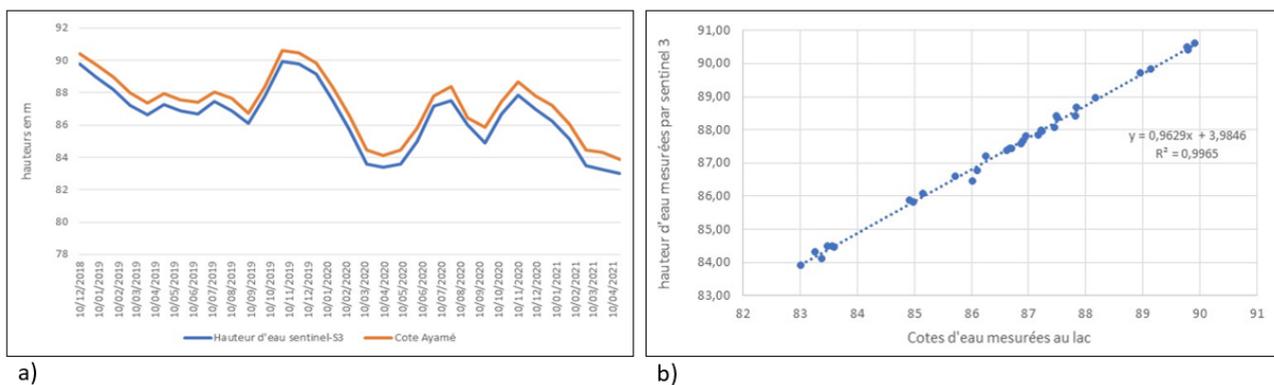


figure 5. a) Cotes d'eau mesurées au lac (Source : CIE) et hauteur d'eau par le satellite Sentinel-3B (Source : THEIA) ; b) droite de régression linéaire entre cotes d'eau mesurées au lac et hauteur d'eau par le satellite Sentinel-3B

Conclusion

L'un des intérêts de ce travail est la validation des mesures de hauteurs d'eau issues du satellite Sentinel-3B par les cotes d'eau observées au Lac d'Ayamé. Ces données satellitaires, en accès libre, ouvrent ainsi un champ de possibilité pour la surveillance des eaux de surveillance comme celui du lac d'Ayamé. Dans un contexte de manque et de fiabilités des données mesurées sur le terrain pour le suivi des surfaces en eau, les données issues de l'imagerie spatiale montrent tout leur intérêt dans l'analyse des variations hydrologiques en complément des données au sol. Le développement des plateformes en ligne d'accès aux produits sur les surfaces en eau (Google Earth Engine) et des hauteurs d'eau (Hydroweb) débouche nécessairement sur un volet opérationnel pour les gestionnaires des lacs et barrage. Les données de la plateforme Hydroweb ne couvrent pas toutes les surfaces en eau continentales. En Côte d'Ivoire, 33 points de mesures virtuelles sont disponibles sur trois des quatre principaux fleuves et sur deux des trois lacs les plus importants. Le lancement par le CNES/NASA du satellite SWOT en fin d'année 2022 (<http://swot.jpl.nasa.gov/>) permettra des mesures de hauteur d'eau des petits lacs et réservoirs avec une répétitivité de 10 à 20 jours.

Remerciements : Les auteurs remercient la Région AURA (Auvergne-Rhône-Alpes) pour son soutien financier dans le cadre du projet incitatif Pack Ambition International 2020 (n° 20 006900 01-40892). Les auteurs remercient également à la direction du barrage d'Ayamé pour la mise à disposition des données hydroclimatiques in-situ ainsi que l'équipe THEIA particulièrement Jean-François Cretaux pour avoir produit et mis à notre disposition les hauteurs d'eau du lac d'Ayamé dans le cadre du programme Hydroweb.

Bibliographie

CIE (Compagnie Ivoirienne d'Electricité), 2021 : *Coupure intempestive d'électricité : la CIE pointe du doigt la sécheresse*. Disponible en ligne (<https://observateurcitoyen.net/article/coupures-intempestives-deelectricite-la-cie-pointe-du-doigt-la-secheresse>)

Cazals C., Rapinel S., Frison P.-L., Bonis A., Mercier G., Mallet C., Corgne S. et Rudant J.-P., 2016 : Mapping and Characterization of Hydrological Dynamics in a Coastal Marsh Using High Temporal Resolution Sentinel-1a Images. *Remote Sensing*, **8**(7), 570.

FAO, 2021 : L'état des ressources en terres et en eau pour l'alimentation et l'agriculture dans le monde. *Rapport de synthèse*, 71 9. Disponible en ligne (<https://reliefweb.int/sites/reliefweb.int/files/resources/cb7654fr.pdf>)

Frappart F., Baup F., Mauban J., Marieu V., Spodar A., Pariso J.-P., Detandt G., 2014 : Estimation des volumes d'eau contenus dans les lacs de faible superficie par télédétection multi-satellitaire et mesures *in situ* : exemple du lac la Bure. *Actes du colloque XIIIèmes Journées Nationales Génie Côtier – Génie Civil*, Dunkerque, 2-4 juillet 2014. Disponible en ligne (<http://www.paralia.fr>)

Ouattara A., Gourene G. et Podoor N. 2009 : Activité Photosynthétique Du Phytoplancton Dans Le Barrage Hydroélectrique D'ayame I (Côte D'ivoire). *Agronomie Africaine*, **19**(1), 63-70.

Servat E., Paturel J.-E., Lubes H., Kouame B., Ouedraogo M., Masson J.-M., 1997 : Climatic variability in humid Africa along the Gulf of Guinea - Part one : detailed analysis of the phenomenon in Côte d'Ivoire. *Journal of Hydrology*, **191**, 1-15.

THEIA/Hydroweb, 2021 : Hydroweb Product User Manual. *THEIA-MU-42-0282-CNES*.

Vanga F., 2011 : Evolution de la pêche au lac d'Ayamé depuis l'expulsion des pêcheurs non nationaux (Côte d'Ivoire). *TROPICULTURA*, 2011, **29**(1), 8-13.