

Connaissances actuelles et orientations futures des recherches sur le complexe de tourbières de la Cuvette centrale du Congo

Traduction par Helen PLANTE, School of Geography, University of Leeds, Leeds, LS2 9JT, United Kingdom.

L'article est la traduction d'un article original publié en anglais dans le n° 350 de la revue *Bois et Forêts des Tropiques*, quatrième trimestre de 2021.

<https://doi.org/10.19182/bft2021.350.a36288>

¹ University of St Andrews, School of Geography and Sustainable Development - St Andrews, KY16 9AJ - United Kingdom

² Université Marien Ngouabi, Faculté des sciences et techniques - Brazzaville - République du Congo

³ Institut supérieur pédagogique de Mbandaka, Département de biologie - Mbandaka - République démocratique du Congo

⁴ University of Leeds, School of Geography - Leeds, LS2 9JT - United Kingdom

⁵ University of Edinburgh, School of Geosciences, Crew Building, The King's Buildings, Alexander Crum Brown Road - Edinburgh, EH9 3FF - United Kingdom

⁶ Cranfield Soil and Agrifood Institute, School of Water, Energy and Environment, Cranfield University, College Road - Cranfield, MK43 0AL - United Kingdom

⁷ University of Nottingham, School of Biosciences - Loughborough, LE12 5RE - United Kingdom

⁸ UK Centre for Ecology & Hydrology, Environment Centre Wales - Deiniol Road, Bangor, LL57 2UW, Gwynedd - United Kingdom

⁹ Université de Kisangani, Faculté de gestion des ressources naturelles renouvelables, Département d'aménagement des écosystèmes et conservation de la biodiversité - Kisangani - République démocratique du Congo

¹⁰ Université Marien Ngouabi, École nationale supérieure d'agronomie et de foresterie - Brazzaville - République du Congo

¹¹ Vrije Universiteit Amsterdam, Department of Ecological Science - Amsterdam, Noord-Holland, 1081 HV - Netherlands

¹² University of Leicester, School of Geography - University Road, Leicester, LE1 7RH - United Kingdom

Auteur correspondant / Corresponding author:
Greta C. DARGIE – geogcd@leeds.ac.uk

Doi : 10.19182/bft2023.355.a37152 – Droit d'auteur © 2023, Bois et Forêts des Tropiques – © Cirad – Date de soumission : 24 décembre 2020 ; date d'acceptation : 22 juin 2021 ; date de publication : 1er décembre 2021 pour la version originale en anglais et 1er mars 2023 pour la version traduite en français.



Licence Creative Commons :
Attribution - 4.0 International.
Attribution-4.0 International (CC BY 4.0)

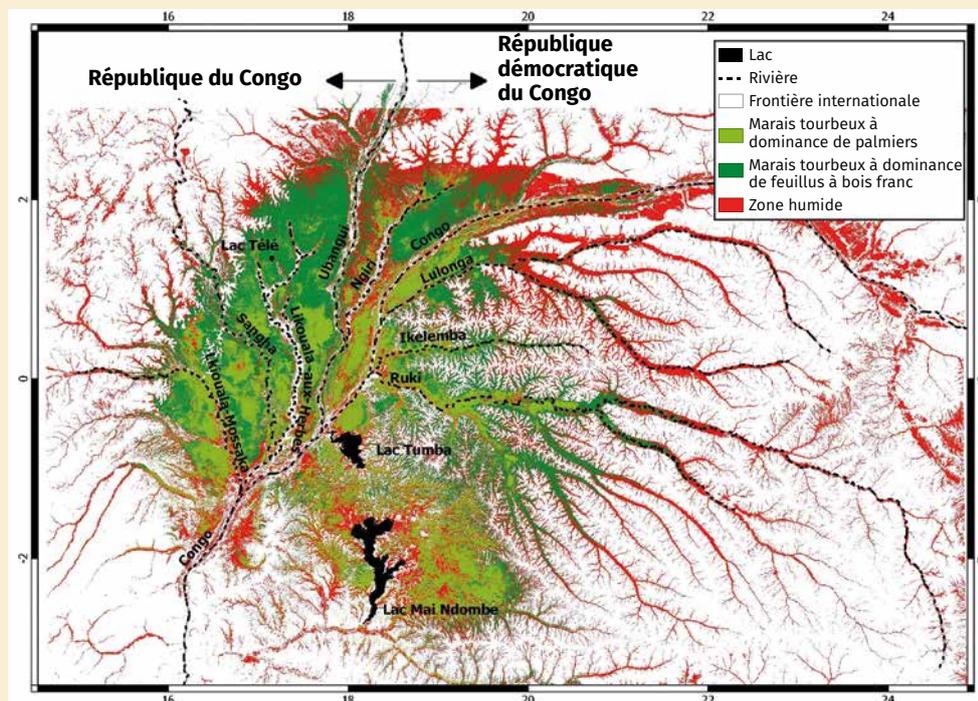


Figure 1.

Carte de la Cuvette centrale montrant la distribution spatiale de la forêt marécageuse tourbeuse à dominance de feuillus à bois franc (remplissage vert foncé) et de la forêt marécageuse tourbeuse dominée par les palmiers (remplissage vert clair) provenant de Dargie *et al.* (2017), et la distribution beaucoup plus large des écosystèmes de zones humides (remplissage rouge) provenant de Bwangoy *et al.* (2010), les principaux lacs (remplissage noir) et les rivières (ligne noire en pointillés) et les frontières internationales (ligne grise).

Map of the Cuvette Centrale showing the spatial distribution of hardwood peat swamp forest (dark green fill) and palm-dominated peat swamp forest (light green fill) sourced from Dargie *et al.* (2017) and the much wider distribution of wetland ecosystems (red fill) sourced from Bwangoy *et al.* (2010), the major lakes (black fill) and rivers (black dashed line) and international borders (grey line).

Citer l'article / To cite the article

Biddulph G. E., Bockko Y. E., Bola P., Crezee B., Dargie G. C., Emba O., Georgiou S., Girkin N., Hawthorne D., Jovani-Sancho A. J., Kanyama T. J., Mampouya W. E., Mbemba M., Sciumbata M., Tyrrell G. (The CongoPeat Early Careers Researchers Group), 2023. Connaissances actuelles et orientations futures des recherches sur le complexe de tourbières de la Cuvette centrale du Congo. *Bois et Forêts des Tropiques*, 355 : 73-86. Doi : <https://doi.org/10.19182/bft2023.355.a37152>

RÉSUMÉ

Connaissances actuelles et orientations futures des recherches sur le complexe de tourbières de la Cuvette centrale du Congo

La Cuvette centrale est le plus vaste complexe de tourbières tropicales au monde, qui s'étend sur environ 145 000 km² en République du Congo et en République démocratique du Congo. Ce complexe stocke environ 30,6 Pg C, soit l'équivalent de trois années d'émissions mondiales de dioxyde de carbone, et représente désormais le premier site Ramsar transnational. Malgré sa taille et son importance mondiale en tant que puits de carbone, les aspects clés de son écologie et de son histoire, notamment sa formation, l'ampleur des flux de gaz à effet de serre, sa biodiversité et l'histoire de l'activité humaine, demeurent relativement peu connus. Nous synthétisons ici les connaissances disponibles sur la Cuvette centrale, en identifiant des domaines clés pour la poursuite des recherches. Enfin, nous examinons le potentiel des modèles mathématiques pour évaluer les trajectoires futures des tourbières en termes d'impacts prévisibles de l'exploitation de ressources et du changement climatique.

Mots-clés : tourbière tropicale, stockage du carbone, émissions de gaz à effet de serre, paléoécologie, biodiversité, Anthropocène, République démocratique du Congo.

ABSTRACT

Current knowledge on the Cuvette Centrale peatland complex and future research directions

The Cuvette Centrale is the largest tropical peatland complex in the world, covering approximately 145,000 km² across the Republic of the Congo and the Democratic Republic of the Congo. It stores ca. 30.6 Pg C, the equivalent of three years of global carbon dioxide emissions and is now the first trans-national Ramsar site. Despite its size and importance as a global carbon store, relatively little is known about key aspects of its ecology and history, including its formation, the scale of greenhouse gas flows, its biodiversity and its history of human activity. Here, we synthesise available knowledge on the Cuvette Centrale, identifying key areas for further research. Finally, we review the potential of mathematical models to assess future trajectories for the peatlands in terms of the potential impacts of resource extraction or climate change.

Keywords: tropical peatland, carbon storage, greenhouse gas emissions, palaeoecology, biodiversity, Anthropocene, Democratic Republic of the Congo.

RESUMEN

Conocimientos actuales sobre el complejo de turberas de la Cuvette Centrale y futuras direcciones de investigación

La Cuvette Centrale es el mayor complejo de turberas tropicales del mundo, con una extensión aproximada de 145 000 km² entre la República del Congo y la República Democrática del Congo. Almacena unas 30,6 Pg C, el equivalente a tres años de emisiones mundiales de dióxido de carbono, y es la primera zona Ramsar transnacional. A pesar de su tamaño e importancia como almacén mundial de carbono, se sabe relativamente poco sobre aspectos clave de su ecología e historia, como su formación, el balance de los flujos de gases de efecto invernadero, la biodiversidad y la historia de la actividad humana. En este artículo sintetizamos los conocimientos disponibles sobre la Cuvette Centrale, identificando las áreas clave para la investigación futura. Por último, revisamos el potencial de los modelos matemáticos para evaluar las trayectorias futuras de las turberas en términos de impacto potencial de la explotación de recursos o del cambio climático.

Palabras clave: turbera tropical, almacenamiento de carbono, emisiones de gases de efecto invernadero, paleoecología, biodiversidad, Antropoceno, República Democrática del Congo.

Introduction

Relativement récemment, il a été révélé que la Cuvette centrale – une immense région de zones humides au cœur du bassin du Congo, à cheval sur la République du Congo (Rép. du Congo) et sur la République démocratique du Congo (RDC) – abrite le plus vaste complexe de tourbières tropicales au monde. On qualifie de zones humides les tourbières ; mais elles se distinguent des autres écosystèmes humides de par leur accumulation d'une quantité importante de matière organique et, ainsi, de carbone. En conséquence, le rôle capital des tourbières au sein du cycle mondial du carbone a été largement reconnu, stockant 600 pétagrammes de carbone (Pg C) selon les estimations (Yu *et al.*, 2010), soit plus d'un tiers du stock de carbone du sol à l'échelle mondiale (Page *et al.*, 2011). Les écosystèmes tourbeux peuvent également jouer un rôle majeur dans la régulation hydrologique à l'échelle régionale et ils fournissent un habitat pour des espèces uniques ou menacées de disparition de la flore et de la faune (Parish *et al.*, 2008). Dans quelques régions du monde, les tourbières sont importantes grâce à leur approvisionnement en nourriture, en matériaux de construction et en remèdes médicinaux (Parish *et al.*, 2008) et au niveau mondial elles occupent souvent une grande place dans la culture et le patrimoine des sociétés humaines (Schulz *et al.*, 2019).

À travers le monde, les menaces de la conversion des terres et du changement climatique pèsent sur les tourbières. En Asie du Sud-Est, l'ampleur et la rapidité de la dégradation des tourbières, liées surtout à leur conversion en plantations de palmiers à huile et de bois à pâte, ont été alarmantes (Miettinen *et al.*, 2016). En 2015, à la suite de graves feux de tourbières, débutant pendant la sécheresse et la forte chaleur d'une année El Niño, dans des zones de tourbières rendues vulnérables aux incendies par le drainage (Miettinen *et al.*, 2017), l'Indonésie était le quatrième émetteur de gaz à effet de serre (Climate Watch, 2019). Les perturbations du commerce, du transport et de l'éducation provoquées par les incendies ont coûté à l'Indonésie l'équivalent de 2 % de son produit intérieur brut (PIB) (World Bank, 2016). Selon les estimations, sur toute la région, la pollution atmosphérique due à ces incendies a entraîné 100 000 morts supplémen-

taires (Kopplitz *et al.*, 2016). L'ironie est que la productivité à long terme et l'avenir d'un grand nombre de ces plantations sur tourbières sont à risque. Ceci est dû à l'affaissement des terrains tourbeux suite au drainage, augmentant ainsi le risque d'une submersion totale des plantations lors de l'abaissement de la surface de la tourbière en dessous du haut niveau de la nappe phréatique pendant la saison des pluies (Sumarga *et al.*, 2016). De plus, dans les tourbières côtières et sous-côtières, les plantations sont à risque en raison de l'exposition des sols acides à sulfates potentiels dont la couche inférieure se compose d'argiles riches en pyrites (Haraguchi, 2016). Par ailleurs, étant pauvres en nutriments dans l'état naturel, souvent les tourbières tropicales en forme de dôme exigent le recours aux engrais lors de leur conversion en terres agricoles, ce qui entraîne des émissions plus élevées d'oxyde nitreux (Cooper *et al.*, 2020).

L'histoire en Asie du Sud-Est souligne les périls de la mise en place d'une politique qui privilégie les bénéfices économiques à court terme au détriment d'une fonction écosystémique. La toute première cartographie des tourbières de la Cuvette centrale date de 2017 (Dargie *et al.*, 2017). Bien que les tourbières soient largement intactes à l'heure actuelle, plusieurs menaces ont été identifiées, notamment le changement climatique, l'exploration des hydrocarbures, l'exploitation forestière industrielle et le développement des infrastructures, qui auraient un impact négatif sur le stock de carbone, la biodiversité et la qualité des eaux (Dargie *et al.*, 2019). La recherche sur les tourbières



Photo 1.
Marais tourbeux composé de feuillus à bois franc.
Hardwood peat swamp.
Photo S. Lewis.

de la Cuvette centrale est encore à ses débuts. Une meilleure compréhension de ces écosystèmes est indispensable à leur préservation. Le présent article fournit une synthèse des connaissances actuelles sur les tourbières de la Cuvette centrale, tout en mettant en évidence les nombreuses lacunes des connaissances scientifiques.

L'étendue des tourbières

La seule cartographie basée sur des études de terrain des tourbières de la Cuvette centrale estime qu'elles occupent une superficie de 145 500 km² (Dargie *et al.*, 2017), soit près de 77 % de l'ensemble des tourbières africaines (d'après l'étendue totale des tourbières africaines de 187 061 km² fournie par Xu *et al.*, 2018). Indépendamment, Gumbricht *et al.* (2017) ont estimé à 125 440 km² la superficie des tourbières de la Cuvette centrale, en s'appuyant uniquement sur les données de télédétection.

Les définitions de la tourbe adoptées tant par Dargie *et al.* (2017) que par Gumbricht *et al.* (2017) sont strictes : une couche végétale partiellement décomposée, avec une épaisseur de 30 cm au minimum et une teneur minimale de matière organique de 65 % pour Dargie *et al.* (2017) ou 50 % pour Gumbricht *et al.* (2017). Par conséquent, les estimations de la superficie des tourbières avancées par Dargie *et al.* (2017) et par Gumbricht *et al.* (2017) sont nettement inférieures à l'estimation de l'étendue totale des zones humides de la Cuvette centrale (tableau I, figure 1, photos 1 et 2). Par exemple, Betbeder *et al.* (2014) estiment que les zones humides forestières de la Cuvette centrale – caractérisées par des forêts qui maintiennent un niveau d'eau stable, des forêts qui subissent des impulsions d'inondation saisonnières et des forêts soumises à des impulsions d'inondation de faible amplitude et de courte durée – s'étendent sur 230 000 km². Bwangoy *et al.* (2010), par contre, ont produit une carte de probabilité des zones humides de la région, également à l'aide d'une approche de télédétection multi-capteurs, comprenant l'ensemble des types de zones humides. Ils ont estimé à 360 000 km² l'étendue totale des zones humides, où tous les pixels correspondent à une probabilité supérieure ou égale à 50 %.

Les stocks et le cycle du carbone dans les tourbières

Bien que Dargie *et al.* (2017) et Gumbricht *et al.* (2017) avancent des estimations de la superficie des tourbières qui ne s'écartent pas considérablement, Gumbricht *et al.* (2017) calculent le volume de la tourbe associée à 915 km³, soit presque trois fois l'estimation de 350 km³ fournie par Dargie *et al.* (2017). Cette divergence tient principalement à la très grande estimation de l'épaisseur de la tourbe utilisée par Gumbricht *et al.* (2017), qui n'est pas cohérente avec les récentes mesures *in situ* relevées par Dargie *et al.* (2017), estimant une épaisseur moyenne (\pm écart-type) et maximale de 2,4 \pm 1,6 m et 5,9 m respectivement. Quoique les estimations qui intègrent les données *in situ* méritent davantage de confiance, Dargie *et al.* (2017) signalent quand

même une incertitude forte en ce qui concerne leurs estimations du stock de carbone pour la Cuvette centrale (entre 6,3 et 46,8 Pg C, avec un intervalle de confiance à 95 %), attribuable principalement à la variabilité notable des épaisseurs de tourbe enregistrées. Dargie *et al.* (2017) présentent une meilleure estimation de 30,6 Pg C souterraine, soit l'équivalent de près de 29 % du réservoir total de carbone dans les tourbières tropicales, ou 5 % du stock de carbone dans les tourbières à l'échelle mondiale. L'incertitude des estimations du stock de carbone total est due aux incertitudes en termes de surface et d'épaisseur de tourbe, ainsi que la densité apparente et la concentration en carbone de la tourbe. Davantage de données *in situ*, représentatives du bassin, amélioreront les estimations du stock de carbone souterrain dans les tourbières de la Cuvette centrale.

Dans la végétation des tourbières de la Cuvette centrale, on estime qu'entre 0,6 et 2,5 Pg C de carbone stocké s'ajoutent au stock de carbone souterrain (Dargie *et al.* 2017). En les comparant avec les forêts adjacentes de terre ferme et d'inondation saisonnière, Bocko *et al.* (2017) ont découvert des stocks de carbone aérien nettement inférieurs dans la forêt marécageuse de tourbière de la Cuvette centrale (forêt marécageuse de tourbière : 147,7 \pm 69,7 t/ha ; forêt de terre ferme : 295,3 \pm 96,3 t/ha ; forêt d'inondation saisonnière : 292,3 \pm 62,8 t/ha). Des différences de structure forestière ont également été constatées en lien avec la contribution des très gros individus (diamètre à hauteur de poitrine, dbh > 70 cm) au stock de carbone aérien apparaissant beaucoup plus élevé dans la forêt de terre ferme et dans la forêt d'inondation saisonnière, alors que dans la forêt marécageuse de tourbière on dénombrait beaucoup moins de très gros individus (Bocko *et al.*, 2017).

Outre l'amélioration des estimations du stock de carbone aérien et souterrain, il est important aussi de comprendre la dynamique du carbone dans les tourbières tropicales. Bocko *et al.* (2017) ont quantifié l'ensemble du carbone du bois mort dans la forêt marécageuse de la Cuvette centrale. Cependant, à ce jour, il n'existe aucune étude publiée répondant à la question de la productivité primaire brute et de la productivité primaire nette dans les tourbières de la Cuvette centrale. Le problème ne se limite pas à cette région ; à travers le monde, rares sont les études qui tentent de quantifier l'ensemble du bilan de carbone d'une tourbière tropicale (Bocko *et al.*, 2017 ; Dargie *et al.*, 2017 ; Pangala *et al.*, 2017).

Malgré sa vaste étendue spatiale, les émissions de gaz à effet de serre (GES) de la Cuvette centrale restent relativement peu connues. Bien que les tourbières tropicales non perturbées soient d'importants émetteurs de méthane (CH₄) (Girkin *et al.*, 2020), elles sont en général des stockeurs nets de carbone. C'est-à-dire que la quantité de carbone accumulée est supérieure à celle relarguée via la décomposition. Cependant, lorsque ces forêts marécageuses de tourbière sont drainées pour permettre la conversion à d'autres usages des terres, elles deviennent des émetteurs importants de dioxyde de carbone (CO₂) et d'oxyde nitreux (N₂O) tandis que les émissions de méthane (CH₄) diminuent sensiblement (Cooper *et al.*, 2020 et références y figurant).

Tableau I.

Estimations de l'étendue des tourbières de la Cuvette centrale et de la superficie plus vaste des zones humides dont elles font partie.

Étude	Superficie des zones humides (km ²)	Superficie des tourbières (km ²)	Notes
Bwangoy <i>et al.</i> , 2010	360 000	-	Classification supervisée des données optiques, radar et topographiques par la méthode de photo-interprétation manuelle
Betbeder <i>et al.</i> , 2014	230 000	-	Classification non supervisée de l'indice de végétation amélioré (EVI) issu du capteur MODIS
Gumbricht <i>et al.</i> , 2017	-	125 440	Modèle à base de règles combinant la modélisation hydrologique et les données optiques et topographiques
Dargie <i>et al.</i> , 2017	-	145 500	Classification supervisée des données optiques, radar et topographiques, à partir des données de vérification sur le terrain

Des facteurs environnementaux régulent les flux de GES, notamment la dynamique de la nappe phréatique, la température de la tourbe, les propriétés de la tourbe, le type de végétation et la chimie des eaux interstitielles (par exemple, le pH, la disponibilité en accepteurs d'électrons terminaux et les niveaux de nutriments). De manière générale, les émissions de CO₂ à la surface de la tourbe augmentent de plus en plus en conditions aérobies lors des niveaux bas des nappes phréatiques, tandis que les émissions de CH₄ croissent de plus en plus en conditions anaérobies lors des niveaux hauts des nappes phréatiques (Couwenberg *et al.*, 2010). D'autre part, le N₂O montre une relation non linéaire avec le degré d'humidité du sol (Couwenberg *et al.*, 2010). En réponse au réchauffement climatique et à l'exposition accrue au rayonnement solaire issue de la déforestation et de la dégradation des tourbières tropicales, des augmentations de la température du sol se produisent et peuvent entraîner des rétroactions qui augmentent radicalement les émissions de CO₂ et de CH₄. Cependant, nous émettons l'hypothèse que la forêt marécageuse de tourbière tropicale va probablement demeurer un stockeur net de carbone en l'absence d'autres perturbations (Cooper *et al.*, 2020). Alors que les émissions de N₂O peuvent s'élever lorsque la température du sol augmente (les tourbières tropicales dégradées étant des zones à risques d'émissions de N₂O), cette réponse dépend de l'atteinte préalable d'autres conditions environnementales optimales, dont la teneur optimale en eau et la concentration de nitrate (Pärn *et al.*, 2018). Des pH plus élevés, pouvant être entraînés par le drainage et la minéralisation de la matière organique du sol, ont également été liés à des émissions de CO₂ et de N₂O plus élevées, tandis que l'effet sur le niveau de CH₄ est moins évident (Hatano *et al.*, 2016). À l'état naturel les tourbières tropicales non perturbées certes émettent des GES, mais on ne doit pas les prendre ni pour des systèmes qui sont des émetteurs nets de carbone ni pour des systèmes qui ont un effet net de réchauffement sur le climat. De fait, pour les tourbières saines, c'est-à-dire des tourbières qui continuent à accumuler de la matière organique, c'est l'inverse : elles

sont des stockeurs nets du carbone et exercent un effet de refroidissement sur le climat mondial (Gallego-Sala *et al.*, 2018).

Le couvert végétal a également une influence sur les émissions de GES provenant des tourbières : dans un premier temps, il fournit des substrats pour la population hétérotrophe du sol sous forme de chutes de litière et de racines (Girkin *et al.*, 2018). Dans un second temps, certaines plantes tolérantes aux inondations dans la forêt marécageuse de tourbière tropicale présentent des adaptations au niveau de l'espèce qui font augmenter les échanges gazeux en conditions d'engorgement. Ces adaptations comprennent des lenticelles agrandies (les pores des tiges), la présence d'aérenchymes (un tissu spongieux et poreux) et des pneumatophores (des racines aériennes adaptées aux échanges gazeux ; Pangala *et al.*, 2017). Ces adaptations peuvent avoir un effet sur les flux soit en augmentant l'oxygénation dans la zone d'enracinement, ce qui augmentera potentiellement la production de CO₂ ou diminuera la production de CH₄, soit en fournissant une voie physique par laquelle le CH₄, produit sous la surface du sol, peut être transféré à l'atmosphère (Girkin *et al.*, 2020).

Jusqu'à présent les seules mesures *in situ* des GES qui ont été publiées pour la Cuvette centrale révèlent que les émissions à partir du sol des zones humides ont une forte variabilité sur de courtes distances spatiales (moins de quelques kilomètres ; Tathy *et al.*, 1992). Lors d'une mise à l'échelle, les auteurs estiment que les forêts marécageuses de la Cuvette centrale émettraient entre 0,0013 et 0,0043 Tg CH₄/ha/an. Ceci est à peu près comparable aux chiffres de Lunt *et al.* (2019), qui ont estimé entre 0,0019 et 0,0028 Tg CH₄/ha/an les émissions mensuelles dans la région entre 2010 et 2016 en combinant les données satellitaires et la modélisation. Les données sur les flux de GES dans les tourbières de la Cuvette centrale sont éparpillées, ce qui limite la compréhension de l'ampleur des flux et des relations entre les flux et les variables environnementales. À l'avenir, pour mieux comprendre les variations spatio-temporelles des flux dans les tourbières de la Cuvette centrale,

les données mesurées *in situ* tant en utilisant des enceintes (< 1 m²) qu'en recourant à des tours à flux (< 1 km²) devraient être intégrées aux données des flux de GES acquises par la télédétection (par exemple, les instruments OCO-2/OCO-3 et Tropomi ; échelles > 1 km²). En combinant ces données avec les répartitions des communautés végétales, les cartes des tourbières et d'inondation, et les modèles de la surface terrestre et de l'atmosphère, on sera en mesure de produire des estimations précises des émissions de GES pour les tourbières à l'échelle régionale.

L'hydrologie des tourbières : l'origine et la dynamique de l'eau

Notre compréhension de la dynamique de l'eau dans le bassin central du Congo est encore à ses débuts (Alsdorf *et al.*, 2016). Les études basées sur la télédétection suggèrent que certaines zones tourbeuses de la Cuvette centrale, notamment les bassins interfluviaux en Rép. du Congo, sont pour la plupart distinctes sur le plan hydrologique des cours d'eau adjacents, l'écoulement de l'eau des rivières vers les tourbières étant très faible (Jung *et al.*, 2010 ; Lee *et al.*, 2011). Il apparaît que les niveaux d'eau en divers points le long du bras principal du Congo sont systématiquement plus bas que dans les zones humides forestières adjacentes (de 0,5 à 3 m ; Lee *et al.*, 2011). De plus, les variations saisonnières de la hauteur d'eau du bras principal du fleuve Congo vont de 2 à 3 m (Kim *et al.*, 2017 ; Lee *et al.*, 2011), tandis que le niveau de la nappe semble fluctuer très peu dans les zones humides forestières. Ceci suggère qu'en saison des pluies l'eau s'écoule de la zone humide vers

la rivière (Yuan *et al.*, 2017). Alsdorf *et al.* (2016) émettent l'hypothèse que les faibles fluctuations de la nappe dans la forêt marécageuse, variant entre la saison sèche et la saison des pluies de 0,5 à 1 m seulement (Lee *et al.*, 2011), seraient la conséquence uniquement des précipitations. En se basant sur les analyses géochimiques et les mesures des niveaux d'eau *in situ*, Dargie *et al.* (2017) proposent également que les précipitations atmosphériques constituent la principale source d'eau alimentant les tourbières des bassins interfluviaux en Rép. du Congo. Par ailleurs, une étude récente, combinant des mesures *in situ* de l'épaisseur de tourbe à des mesures de la topographie avec un LiDAR à la surface d'une vaste tourbière interfluviale dans le département de la Likouala en Rép. du Congo, a montré que la tourbière a une structure en forme de dôme peu profonde (Davenport *et al.*, 2020). Les tourbières en forme de dôme signalent classiquement les conditions ombrotrophes, c'est-à-dire alimentées par les eaux de pluie.

Cependant, la recherche citée ci-dessus s'est concentrée sur les bassins interfluviaux en Rép. du Congo et la conclusion selon laquelle les tourbières sont des systèmes ombrotrophes ne s'applique probablement pas à l'ensemble des zones tourbeuses de la Cuvette centrale. En se fondant sur les données de télédétection multi-capteurs, Lee *et al.* (2011) ont conclu que le ruissellement des hautes terres locales (provenant de forêts de terre ferme situées en altitude) constitue la principale source d'eau alimentant les zones humides du Congo. De plus, même si l'on rencontre des profondeurs d'inondation plus faibles (< 0,6 m) dans les bassins interfluviaux, par exemple entre le bras principal du Congo et les rivières de l'Oubangui ou du Ngiri (Lee *et al.*, 2015), il existe d'étroites bandes de zones

humides fluviales à côté du bras principal du Congo et le long de certains tributaires de la rive gauche du Congo en RDC qui connaissent d'importantes inondations jusqu'à 1 à 1,5 m au cours de la principale saison des pluies (Lee *et al.*, 2015). Plutôt que les précipitations atmosphériques seules, cela suggère que certains secteurs des tourbières de la Cuvette centrale bénéficient de l'afflux provenant des rivières ou via le ruissellement des hautes terres. L'étendue spatiale de ces tourbières rivulaires à travers le bassin n'est pas claire, car la plupart des études récentes par télédétection ne concernent qu'une seule superficie de 350 x 350 km dans la partie centrale de la région (par exemple Kim *et al.*, 2017 ; Lee *et al.*, 2011, 2015). En s'appuyant sur des cartes des niveaux de nappe basse et haute dans l'ensemble du bassin du Congo, des recherches antérieures suggèrent qu'on retrouve des plaines inondables avec des niveaux de nappe haute : au nord et à l'est du lac Mai-Ndombe ; plus à l'est/en amont sur les



Photo 2.
Marais dominé par les palmiers.
Palm-dominated swamp.
Photo G. Dargie.

affluents de la rive gauche du Congo ; et le long des rivières de la Likouala-Mossaka et Sangha en Rép. du Congo (figure 1, photos 1 et 2 ; Jung *et al.*, 2010 ; Rosenqvist et Birkett, 2002).

Les travaux futurs devraient en priorité suivre les niveaux de nappe à travers les tourbières, tant *in situ* que par télédétection, en ciblant des sites de tourbière très divers au sein de la Cuvette centrale, à la fois en termes de différents types d'hydrologie et de végétation. Les données radar à grande longueur d'onde sont utiles en particulier pour la cartographie de l'étendue de l'inondation dans l'ensemble du bassin du Congo, puisque le signal est capable de pénétrer la canopée forestière et détecter les différents modèles d'étendue des inondations au niveau du sol (Alsdorf *et al.*, 2016 ; Betbeder *et al.*, 2014 ; Bwangoy *et al.*, 2010 ; Jung *et al.*, 2010). Les missions radar satellitaires, notamment Biomass de l'ESA (avec une fenêtre de lancement en 2021) et Nisar de la NASA (avec une fenêtre de lancement en 2022), fourniront des données ouvertes qui contribueront à une meilleure évaluation de la dynamique des inondations à travers les tourbières. Outre les tourbières elles-mêmes, la connaissance de l'hydrodynamique du fleuve Congo et de ses affluents est indispensable à la compréhension des relations entre les rivières et les tourbières adjacentes. Quoique une amélioration de la résolution spatio-temporelle des informations télédétections relatives aux eaux de surface soit en perspective grâce au lancement de nouvelles missions satellitaires, comme SWOT (Eaux de surface et topographie de l'océan ; NASA, 2020), Carr *et al.* (2019) démontrent que les données *in situ* sur la bathymétrie, le débit et la hauteur d'eau du bras principal du fleuve Congo ne peuvent pas être remplacées entièrement par les données de télédétection. Par ailleurs, il serait utile de développer les travaux de Davenport *et al.* (2020) en mesurant l'élévation de la surface des tourbières dans divers sites, notamment dans les tourbières fluviales à l'intérieur de vallées, pour aider à distinguer les zones tourbeuses qui sont alimentées uniquement en eaux de pluie et celles qui reçoivent de l'eau provenant d'autres sources. La façon dont les écoulements de surface et les écoulements souterrains pourraient contribuer au bilan hydrique au travers des tourbières est peu connu. L'écoulement de surface provenant des forêts de terre ferme adjacentes est d'un intérêt tout particulier, étant donné que cela pourrait être affecté par un changement de l'occupation du sol à l'avenir, par exemple par la déforestation.

Si l'on parvient à une appréciation plus fine de la dynamique hydrologique des tourbières, les bases seront posées pour que la recherche puisse évoluer vers une compréhension de l'hydrologie des tourbières davantage axée sur les processus, par le biais de la modélisation (Baird *et al.*, 2017). Une meilleure connaissance du bilan hydrique des tourbières est indispensable à la compréhension de la croissance des dépôts tourbeux et à l'identification des secteurs de la tourbière qui sont les plus exposés aux effets du changement climatique. Une cartographie spatio-temporelle complète du bilan hydrique des tourbières contribuera à une meilleure compréhension des flux des GES, soit en tant que donnée d'entrée pour la modélisation des flux, soit en permettant de mettre à l'échelle du bassin les mesures *in situ*.

La formation et le développement des tourbières

La datation par le radiocarbone des couches de tourbe basale sur plusieurs sites de la Cuvette centrale montre que les tourbières se sont mises en place entre 10 554 et 7 137 ans BP (années ¹⁴C calibrées avant le présent, où le présent se définit comme l'an 1950 ; Dargie *et al.*, 2017) pendant la période africaine humide (14 800 - 5 500 ans BP), une période de pluviométrie plus abondante dans toute l'Afrique. À l'heure actuelle, tous les sites de tourbière de la Cuvette centrale pour lesquels les dates de référence sont disponibles se situent dans le département de la Likouala en Rép. du Congo, tous au sein des bassins interfluviaux. Pourtant, les tourbières à travers la Cuvette centrale présentent potentiellement des hydrologies très hétérogènes, et donc des processus et des chronologies de mise en place et de développement des tourbières très contrastés sont possibles. Pour déterminer la variation spatiale potentielle associée à la chronologie de mise en place des tourbières, il est essentiel d'acquérir des dates de référence de divers types de tourbières à travers la Cuvette centrale. Cela permettra de replacer dans son contexte la mise en place des tourbières avec les changements climatiques et de végétation survenus simultanément. En plus de la datation de référence des profils de tourbe, il est également important de déterminer le taux d'accumulation verticale de la tourbe en datant la portion tourbeuse superposée. En combinant des données paléoclimatiques et paléoenvironnementales, ces informations amélioreraient notre compréhension de ce qui conduit au développement de la tourbe au fil du temps. Nous pourrions explorer les relations entre l'accumulation de tourbe et les conditions climatiques et environnementales.

La saturation en eau, sous l'influence des précipitations, joue un rôle important dans le développement des tourbières, mais les conséquences des changements climatiques antérieurs sur le développement des tourbières de la Cuvette centrale sont encore méconnues (Dargie *et al.*, 2019). La pluviométrie moyenne annuelle dans le bassin du Congo (~ 1 700 mm/an ; Samba et Nganga, 2012) est moins élevée par rapport aux autres tourbières tropicales. Toutefois, la saison des pluies biannuelle et les gradients topographiques faibles favorisent le maintien d'une nappe phréatique haute, assurant la préservation de la tourbe actuelle. Le rôle du fleuve Congo dans la mise en place et le développement des tourbières est encore inconnu ; mais il est vraisemblable que les modèles d'écoulement, d'évacuation et de drainage influent sur la nappe phréatique des tourbières. Les cours d'eau du bassin du Congo présentent une pente extrêmement faible (environ 3 cm pour 1 km) et les caractéristiques sinueuses observées dans d'autres régions tropicales, par exemple en Amazonie, y sont ici largement absentes. Comparé au bassin amazonien, le fleuve Congo présente de faibles variations du niveau d'eau, ce qui pourrait participer à la rétention en eau au sein de la Cuvette centrale (Kim *et al.*, 2017 et références y figurant). Pour explorer ces variations en termes d'accumulation et

de préservation de la tourbe, il sera important d'acquiescer des mesures de différentes étendues de chaque morphologie de tourbières, non seulement dans la caractérisation de l'histoire des tourbières, mais aussi dans la compréhension des relations entre l'hydrologie, la végétation, la profondeur de la tourbe et son apparition. De plus, les futures études – combinant plusieurs indicateurs indirects dont les thécamibiens (amibes « encapsulées »), l'analyse isotopique à la fois globale et de composés spécifiques, les études hydrologiques – permettront de reconstituer la hauteur de la nappe phréatique dans le passé, les modèles pluviométriques et les informations sur le degré de dégradation de la tourbe dans le passé. Combinée aux études hydrologiques dans le présent telles que la cartographie des inondations actuelles, l'approche apporterait une compréhension supplémentaire des fluctuations de la nappe phréatique dans les tourbières de la Cuvette centrale.

L'appréciation des changements de végétation passés dans la Cuvette centrale est limitée. Quelques études publiées examinent les changements de végétation passés dans les forêts marécageuses pendant l'Holocène récent, les changements les plus anciens datant autour de 3 300 ans cal BP (par exemple, Brncic *et al.*, 2007, 2009 ; Tovar *et al.*, 2015). Bien que ces enregistrements révèlent des périodes d'aridité plus marquées, la permanence du couvert végétal de type forêt marécageuse tout au long de la période montre une certaine résilience face aux changements de la pluviométrie. Hors de la Cuvette centrale, au sud de la Rép. du Congo, des enregistrements paléoécologiques plus anciens existent. Le plus ancien, une carotte de tourbe prélevée de l'étang de Ngamakala (Elenga *et al.*, 1994) sur les plateaux Batéké, datée à 24 000 ans cal BP, enregistre plusieurs phases de recul et d'expansion de la forêt marécageuse en réponse au climat. Après avoir connu un recul à partir d'environ 24 000 ans cal BP, une nouvelle phase d'expansion des forêts marécageuses sur le site s'est déclenchée pendant l'Holocène ancien. Cependant, autour de 3 000 ans cal BP, l'étendue forestière était en fort recul. On enregistre ce recul dans les tourbières côtières congolaises aussi (Elenga *et al.*, 2001) et parmi de nombreux enregistrements de l'Afrique centrale (Giresse *et al.*, 2020). À cette époque, bien que les enregistrements marins (Schefuss *et al.*, 2016) et terrestres (Bonnefille et Chalie, 2000) montrent une augmentation de l'aridité à travers la région, les débats se poursuivent à propos du recul forestier induit par le climat seul ou par le climat couplé aux activités anthropiques (Garcin *et al.*, 2018 ; Giresse *et al.*, 2020). Les restes de charbon de bois indiquent une augmentation des feux dans le bassin du Congo pendant l'Holocène récent, surtout autour de 1 000 cal BP, associés aux incendies anthropiques (Hubau *et al.*, 2015). Cependant, tout au long de l'Holocène, plusieurs périodes de montée en fréquence des incendies ont été observées, liées aux conditions climatiques plus sèches (Hubau *et al.*, 2013). À ces périodes, les savanes étaient en expansion et les forêts sont devenues plus ouvertes, offrant des combustibles inflammables ainsi que des secteurs ouverts prédisposant aux incendies à l'intérieur de la forêt (Hubau *et al.*, 2013). À l'heure actuelle, des enregistrements paléoenvironnementaux détaillés avec

de multiples indicateurs n'existent pas pour la région de la Cuvette centrale. De plus amples enregistrements palynologiques et de charbon de bois de la Cuvette centrale contribueront à nous éclairer sur la végétation et l'histoire des incendies dans ces tourbières, fournissant des informations sur leur niveau de résilience face au changement climatique et aux activités anthropiques. L'idéal serait d'étudier les enregistrements paléoenvironnementaux de multiples profils verticaux prélevés sur un seul ou sur plusieurs sites afin de déterminer le degré d'hétérogénéité dans le développement des tourbières à l'intérieur ou à travers les sites. Cette approche s'est avérée utile dans d'autres sites de tourbière (par exemple, en Amazonie ; Kelly *et al.*, 2020).

La biodiversité des tourbières : la flore et la faune

L'étendue et l'inaccessibilité des zones humides forestières de la Cuvette centrale, ainsi que l'absence de prospections systématiques depuis les années 1960, expliquent l'insuffisance des connaissances sur la biodiversité des communautés végétales des tourbières de cet espace. Les ouvrages de Lebrun et Gilbert (1954) et Evrard (1968) sont parmi les plus éminents sur la classification des communautés végétales en RDC. Alors que la classification de Lebrun et Gilbert regroupe une grande diversité de types forestiers associés aux sols hydromorphes, par exemple la forêt marécageuse inondée, ripicole, rivulaire, vallicole alluvionnaire et les mangroves, Evrard (1968), pour sa part, se concentre tout particulièrement sur la classification écologique des différents types forestiers sur sol hydromorphe dans le bassin du Congo, une classification qui a été utilisée ultérieurement par Betbeder *et al.* (2014) afin d'interpréter leur carte d'inondation des forêts de la Cuvette centrale. Toutefois, il existe fréquemment une confusion et une dérive sémantique entre les définitions des forêts liées aux sols hydromorphes et les zones forestières humides. Evrard (1968) a dénombré 106 espèces d'arbres regroupées en 21 familles de plantes vasculaires qui sont caractéristiques des écosystèmes forestiers hydromorphes. Plusieurs auteurs ont par ailleurs établi des listes d'espèces qui sont caractéristiques des forêts marécageuses, inondées ou périodiquement inondées du bassin du Congo, dont des espèces telles que *Symphonia gobulifera* L. f. (Clusiaceae), des espèces du genre *Mitragyna* (Rubiaceae) et *Alstonia* (Apocynaceae), ainsi que d'autres espèces telles que *Oubanguia africana* Baill. (Scytopetalaceae), *Entandrophragma palustre* Stander (Meliaceae), *Daniellia pynaertii* De Wild. et *Guibourtia demeusei* (Harms) J. Léonard (Fabaceae), *Raphia laurentii* De Wild., *R. sese* De Wild. et plusieurs rotins (Arecaceae) (Hughes et Hughes, 1992 ; Bocko *et al.*, 2016, et références y figurant). Pour ce qui est des tourbières en particulier, une étude récente préliminaire a documenté jusqu'à ce jour environ 100 espèces de plantes ligneuses et herbacées dans un des blocs des tourbières de la Cuvette centrale (Befale et Mpama, comm. orale C. Ewango, 2020). Malgré cela, un travail considérable reste à faire dans la caractérisation des communautés végétales des tourbières en termes de leur

phylogénie et leur phytomorphologie. Il s'avère important aussi de démêler les facteurs (biotiques et abiotiques) qui déterminent la composition des espèces. En particulier, les relations entre les communautés végétales des tourbières et l'hydrologie sont encore mal comprises et nécessitent une exploration en détail, par exemple la profondeur et la durée des inondations ainsi que la géochimie des eaux. De plus, les variations en termes de production et de dispersion pollinique des communautés végétales caractéristiques éclairent d'une manière importante les études palynologiques et la reconstitution de l'évolution passée de la végétation. Dans le bassin du Congo, Elenga *et al.* (2000) ont comparé le signal pollinique des échantillons de surface avec la composition végétale qui les entoure, confirmant que la pluie pollinique moderne reflète pour la plupart la végétation observée dans le présent. Toutefois, de futures études sur la Cuvette centrale similaires à celle-ci doivent être menées afin de déterminer les relations entre la pluie pollinique, le dépôt de taxons individuels et leur abondance, permettant à la fois d'améliorer les interprétations palynologiques et de mieux comprendre la production pollinique et la dispersion de taxons individuels de la forêt marécageuse. Par exemple, Tovar *et al.* (2019) ont déterminé que, dans une forêt monodominante à *Gilbertiodendron dewevrei*, ce taxon est largement sous-représenté dans le signal pollinique du fait de sa faible production pollinique, ce qui revêt une importance majeure dans le cadre des interprétations palynologiques. Les tourbières forestières de la Cuvette centrale se trouvent le long des plaines inondables fluviales (des rivières aux eaux noires acides) et dans les bassins interfluviaux, côtoyant des rivières qui présentent un large éventail de biogéochimies différentes (Bouillon *et al.*, 2014). Il est donc vraisemblable que des facteurs tels que la profondeur et la durée des inondations et le statut des nutriments seraient à l'origine d'une certaine partie de la variation spatiale de la répartition végétale. Des facteurs biotiques pourraient aussi avoir une influence, tels que les limitations de la dispersion des graines et la structure de la canopée, modifiant le rayonnement et la température de surface. Par ailleurs, il est important de comprendre les processus à des échelles spatiales différentes, allant de l'échelle du bassin à des échelles très localisées.

Des recherches sur la diversité faunistique de la Cuvette centrale ont mis en évidence que les zones humides forestières en particulier présentent de fortes densités de population d'espèces de singes telles que le gorille de plaine (*Gorilla gorilla gorilla*), le chimpanzé (*Pan troglodytes* Blumenbach) et le bonobo (*Pan paniscus* Schwartz ; Rainey *et al.*, 2010 ; Inogwabini *et al.*, 2013). D'autres espèces dont la présence a été notée dans les marécages de la Cuvette centrale comprennent l'éléphant de forêt d'Afrique (*Loxodonta cyclotis* Matschie) et le crocodile nain (*Osteolaemus tetraspis* Cope), lequel a été enregistré en construisant ses nids avec de la tourbe (Riley et Huchzremer, 1999). Cependant, les études sur les espèces moins emblématiques des tourbières sont encore très lacunaires. Dans la province de l'Équateur, en RDC, R. Monsembula (comm. pers., 2020) a signalé que les chasseurs locaux pouvaient dénombrer au moins 40 espèces de mammifères,

26 espèces de reptiles et 17 espèces d'oiseaux présentes dans les tourbières. Aucune information n'est disponible pour les amphibiens et les macro-invertébrés, mais 53 espèces de poissons ont été identifiées (R. Monsembula, comm. pers., 2020).

L'utilisation humaine des ressources des tourbières

Rares sont les études qui s'intéressent aux activités socio-économiques des habitants vivant à l'intérieur et dans la zone qui borde les tourbières de la Cuvette centrale. Si certaines données existent, liées à l'usage des ressources naturelles par la communauté à l'intérieur des parcs nationaux qui contiennent les tourbières (WCS, 2019a ; WCS, 2019b), il n'y a pas de précisions sur l'écosystème où ces ressources naturelles ont été collectées. Nous, les auteurs, avons observé personnellement la récolte de la nourriture par les membres de la communauté dans les tourbières, telle que la viande de brousse, les poissons, les chenilles, les fruits et le miel, ainsi que du combustible pour faire du feu. De plus, certaines espèces d'arbres et de lianes ont des usages médicaux et fournissent des matériaux de construction et des fibres, et les frondes de *Raphia laurentii* sont utilisées comme matériel pour les toits. Bien qu'il ne s'agisse pas d'une espèce commerciale au niveau international, une demande des marchés locaux pour l'espèce *D. pynaertii*, utilisée pour la construction dans les zones urbaines, a également conduit à des niveaux élevés d'abattage sélectif dans les tourbières forestières de la RDC (observations personnelles des auteurs). Il est également clair que de nombreuses communautés ont de fortes croyances et pratiques spirituelles liées à leurs forêts. Cependant, la vraie valeur économique et culturelle des tourbières pour les communautés locales est encore largement méconnue sur le plan scientifique et c'est un domaine qui reste très peu investigué. Les recherches de Cole *et al.* (2021) en Asie du Sud-Est ont révélé un manque de communication extrême entre les populations locales et la communauté internationale, ce qui donne lieu à des lacunes considérables dans les connaissances et une déconnexion totale entre les deux en termes de souhaits sur la façon de gérer les tourbières. En réalisant des entretiens avec les communautés locales et en les accompagnant dans les zones de tourbières qu'elles utilisent, le travail en Amazonie péruvienne a permis de montrer non seulement les fonctions et les valeurs qu'elles appliquent aux tourbières – en termes de ressources et de croyances culturelles et spirituelles, et de diversité de ces valeurs entre les différentes communautés – mais aussi de contribuer à identifier les moyens par lesquels des acteurs externes pourraient aider les communautés à satisfaire leurs besoins tout en gérant les tourbières de manière durable (Schulz *et al.*, 2019). La tenue de conversations et de consultations similaires avec les communautés de la Cuvette centrale est nécessaire pour s'assurer que l'orientation de la gestion des tourbières dans la région se fait au bénéfice des communautés locales et en tenant compte de leur appui.

À l'heure actuelle, les activités économiques à grande échelle sont peu nombreuses dans les tourbières de la Cuvette centrale. Cependant, Dargie *et al.* (2019) ont souligné les menaces potentielles liées à l'exploration et à l'exploitation des hydrocarbures au sein des tourbières. L'annonce en 2019 de la découverte de pétrole sous une concession d'hydrocarbures recouvrant des tourbières en Rép. du Congo (Le Monde/AFP, 2019) rappelle à quel point cette menace est réelle. Ces activités s'accompagnent du développement des infrastructures, telles que les routes, ce qui peut faciliter par inadvertance l'accès à la forêt, augmentant à son tour la déforestation, la dégradation et la perte de biodiversité. Des impacts sur l'hydrologie des tourbières sont également possibles. En RDC, en particulier, les zones cartographiées comme tourbières forestières ont été soumises à la déforestation à cause de l'agriculture sur brûlis au bord des routes (Miles *et al.*, 2017).

L'avenir du complexe de tourbières de la Cuvette centrale

L'avenir des tourbières de la Cuvette centrale dépendra largement des facteurs socio-économiques ainsi que de la volonté politique et de la capacité de préserver les tourbières, tant au niveau national qu'international. La Déclaration de Brazzaville, signée par la Rép. du Congo, la RDC et l'Indonésie, a affirmé qu'il y aurait un effort de coopération entre les trois nations pour assurer la protection des tourbières du bassin du Congo (Programme des Nations unies pour l'environnement, 2018). Cependant, le degré de respect de cet engagement dépendra probablement du niveau de soutien financier international fourni et des voies de développement économique concurrentes.

Le changement climatique aura également un rôle déterminant dans l'avenir des tourbières de la Cuvette centrale. Les changements dans les modèles de précipitations, de température, et donc les taux d'évapotranspiration, auront un impact sur l'équilibre hydrologique des tourbières et, par conséquent, sur l'équilibre entre l'accumulation et la décomposition de la matière organique. Cependant, les effets du changement climatique dans le bassin du Congo sont loin d'être clairs. Les températures devraient augmenter de 0,5 °C d'ici 2100, même selon des scénarios d'émissions modestes (Niang *et al.*, 2014), ce qui pourrait à son tour accroître les taux d'évapotranspiration. Cependant, l'évolution des précipitations est beaucoup moins évidente. Le manque cruel d'observations sur le terrain à travers le bassin pose des problèmes pour l'estimation des précipitations actuelles sur le bassin, sans parler de l'avenir selon les différents scénarios d'émissions (Washington *et al.*, 2013 ; Nicholson *et al.*, 2019). Quoique certains ensembles de modèles montrent un taux d'humidité légèrement à la hausse face au réchauffement planétaire à travers l'Afrique centrale, l'ordre de grandeur du changement est faible par rapport à la variabilité entre les modèles individuels (Creese *et al.*, 2019). D'autres ensembles de modèles, en revanche, montrent une augmentation des précipitations extrêmes, accompagnée d'un renforcement de l'inten-

sité des précipitations, mais aussi d'une intensification et d'une plus grande fréquence des épisodes de sécheresse (Dosio *et al.*, 2019). Les projections futures sont encore compliquées par les incertitudes concernant les changements d'utilisation des terres, qui à leur tour ont un impact sur les rétroactions entre la biosphère et l'atmosphère (Akkermans *et al.*, 2014). Alors qu'il convient de disposer de plus d'observations météorologiques au sol à long terme, l'urgence de la situation fait qu'on entend également des appels à des campagnes de terrain intensives visant l'acquisition de données météorologiques qui, à court terme, peuvent aider à affiner les estimations des précipitations obtenues à partir des satellites sur l'ensemble du bassin (Washington *et al.*, 2013).

En plus d'être soumises aux effets du changement climatique, les tourbières peuvent également aider à lutter contre ou à contribuer aux changements climatiques, soit en absorbant le carbone de l'atmosphère lors de l'accumulation de matière organique, soit en libérant du carbone dans l'atmosphère lorsqu'elles sont en état de décomposition. Par exemple, selon les estimations, les tourbières des hautes latitudes de l'hémisphère Nord ont absorbé 547 Pg C depuis le dernier maximum glaciaire (Yu *et al.*, 2010). Les futures simulations prévoient que ce puits de carbone des tourbières du nord devrait se maintenir au moins jusqu'à la fin du siècle malgré les températures mondiales plus élevées, grâce à une augmentation de la durée de la saison de croissance des communautés végétales des tourbières (Qiu *et al.*, 2019, et références qui y figurent), bien que certains affirment que cela pourrait être contrebalancé par une augmentation de la sécheresse, la poursuite des changements d'utilisation des terres et des incendies (Loisel *et al.*, 2021). Cependant, dans les régions tropicales, où les communautés végétales des tourbières se développent déjà sous des températures élevées, il est peu probable que la productivité de la biomasse augmente avec de nouvelles élévations de température, et il y a des signes que l'effet de fertilisation de l'augmentation des niveaux de CO₂ sur les forêts tropicales commence à plafonner (Hubau *et al.*, 2020). Par conséquent, il est plus probable qu'une hausse des températures entraîne une décomposition accrue de la tourbe, transformant potentiellement les tourbières tropicales en une source nette de carbone (Gallego-Sala *et al.*, 2018).

Des modèles mathématiques peuvent être utilisés pour faire des prédictions sur l'avenir des tourbières de la Cuvette centrale selon différents scénarios de changement d'utilisation des terres et de changement climatique à différentes échelles spatiales. Les modèles de développement des tourbières fonctionnent à l'échelle d'un site spécifique et il en existe plusieurs qui pourraient potentiellement être adaptés à un environnement tropical (Farmer *et al.*, 2011). Cependant, jusqu'à présent, seuls trois modèles ont été appliqués aux tourbières tropicales. Le premier est HPMTrop, un modèle unidimensionnel où la tourbière est représentée comme une seule colonne qui peut accumuler ou perdre de la tourbe (Kurnianto *et al.*, 2015). Le deuxième est Digibog, un modèle tridimensionnel, où la tourbière est représentée comme une grille de colonnes de tourbe qui

interagissent entre elles (Baird *et al.*, 2017). Le troisième est de Cobb *et al.* (2017), qui ont développé un modèle pour simuler la topographie des tourbières sous différents climats tropicaux, un modèle qu'ils ont ensuite appliqué aux tourbières intactes et drainées de Bornéo (Cobb *et al.*, 2020). Cependant, un défi considérable à relever dans la mise en œuvre de ces modèles est le manque de données *in situ* à travers les tropiques et tout particulièrement dans le bassin du Congo, pour leur paramétrage et leur validation.

De l'échelle régionale à mondiale, les modèles du système Terre (ESM) sont des modèles qui, en plus de représenter les systèmes climatiques mondiaux, tentent la représentation des processus biogéochimiques des systèmes terrestres et aquatiques et les interactions entre ces différentes composantes. Traditionnellement, ces modèles du système Terre ne comportent pas les tourbières et, bien que des progrès aient été réalisés pour intégrer les tourbières de haute latitude dans certains modèles du système Terre (par exemple, Bechtold *et al.*, 2019 et Qiu *et al.*, 2019), il n'y a aucun modèle du système Terre qui représente les tourbières de la Cuvette centrale. Par conséquent, les rétroactions potentielles des tourbières de la Cuvette centrale ne sont pas actuellement prises en compte dans les scénarios de changement climatique, ce qui ajoute à l'incertitude pour la région.

Conclusion

Il est incontestable que les tourbières de la Cuvette centrale constituent un piège de carbone d'importance mondiale. On doit encore mener davantage de recherches pour améliorer les cartes des tourbières et réduire les grandes incertitudes autour de l'estimation des stocks de carbone, tout en reconnaissant la difficulté d'acquérir des données dans la région en raison de l'immensité et de l'inaccessibilité relative de ces écosystèmes tourbeux. Pourtant, la question ne se limite pas aux stocks de carbone ; la connaissance de la dynamique du carbone des tourbières de la Cuvette centrale et de leur rôle dans le cycle mondial du carbone est encore lacunaire. L'accumulation et la préservation du carbone dans un écosystème tourbeux varient fortement en fonction du régime hydrologique de la tourbière. Des signes clairs suggèrent qu'au moins certains secteurs des tourbières de la Cuvette centrale sont des écosystèmes pluviaux, mais il faut tenir compte de l'hétérogénéité probable de l'hydrologie des tourbières à travers la région, et de futures études devront être menées pour comprendre les relations entre les réseaux fluviaux et les zones humides adjacentes. Bien que des études aient commencé il y a plusieurs décennies s'intéressant à la caractérisation des différentes communautés végétales de la Cuvette centrale, il existe plusieurs limites à l'appréciation de la phylogénie et la phytomorphologie des communautés végétales des tourbières et leurs variations spatiales. Quant à la biodiversité faunistique, les tourbières de la Cuvette centrale abritent des espèces qui sont parmi les plus emblématiques d'Afrique centrale, comme l'éléphant de forêt et le gorille occidental, mais, au-delà de ces observations, le rôle que jouent ces tourbières dans le maintien

de la faune reste très peu étudié. La compréhension de la valeur écologique de ces tourbières, au-delà de leur rôle dans le stockage du carbone, doit s'étendre également à la manière dont elles soutiennent les moyens de subsistance et les cultures locales. Bien que les tourbières de la Cuvette centrale soient en grande partie intactes, certaines menaces potentielles, notamment l'exploration d'hydrocarbures, l'exploitation forestière et les plantations, ont été identifiées. Le manque de données sur les tourbières de la Cuvette centrale rend difficile une évaluation complète des impacts négatifs de ces activités sur les tourbières, mais le moindre abaissement des niveaux de la nappe phréatique est susceptible d'entraîner une augmentation des émissions de carbone. Des incertitudes entourent également l'impact du changement climatique. Comme les dates de référence disponibles sont peu nombreuses et proviennent d'une seule région de la Rép. du Congo, l'histoire du développement des tourbières et la façon dont elles ont réagi aux changements climatiques passés sont largement inconnues. Cela limite notre compréhension des trajectoires futures possibles. Pourtant, ce qui nous limite encore plus, c'est peut-être l'incertitude liée à l'impact du changement climatique futur sur les modèles de précipitations à travers la région. Le manque de données météorologiques *in situ* dans le bassin du Congo pour alimenter les modèles du système Terre souligne que la nécessité d'acquérir des données dans cette région est urgente et ne se limite pas uniquement aux tourbières. Face à de telles incertitudes, il est clair qu'une mobilisation internationale de taille est cruciale pour protéger cet écosystème d'importance mondiale.

Remerciements

Les auteurs tiennent à remercier Corneille Ewango et Raoul Monsembula pour leurs communications personnelles. Les membres du groupe de chercheurs en début de carrière CongoPeat travaillent directement ou en partenariat avec le projet CongoPeat.

Financement

L'étude a été financée par le Conseil de recherche sur l'environnement naturel (NERC, n° d'allocation : NE/R016860/1 ; <https://congopeat.net/>), qui a fourni aux auteurs un soutien financier et académique total ou partiel.

Références bibliographiques

- Akkermans T., Thiery W., Van Lipzig N.P.M., 2014. The regional climate impact of a realistic future deforestation scenario in the Congo Basin. *Journal of Climate*, 27 (7): 2714-2734. <https://doi.org/10.1175/JCLI-D-13-00361.1>
- Alsdorf D., Beighley E., Laraque A., Lee H., Tshimanga R., O'Loughlin F., *et al.*, 2016. Opportunities for hydrologic research in the Congo Basin. *Reviews of Geophysics*, 54: 378-409. <https://doi.org/10.1002/2016RG000517>
- Baird A. J., Low R., Young D., Swindles G. T., Lopez O. R., Page S., 2017. High permeability explains the vulnerability of the carbon store in drained tropical peatlands. *Geophysical Research Letters*, 44: 1333-1339. <https://doi.org/10.1002/2016GL072245>

- Bechtold M., De Lannoy G. J. M., Koster R. D., Reichle R. H., Mahanama S. P., Bleuten W., *et al.*, 2019. PEAT-CLSM: A specific treatment of peatland hydrology in the NASA Catchment Land Surface Model. *Journal of Advances in Modelling Earth Systems*, 11: 2130-2162. <https://doi.org/10.1029/2018MS001574>
- Betbeder J., Gond V., Frappart F., Baghdadi N. N., Briant G., Bartholomé E., 2014. Mapping of Central Africa Forested Wetlands Using Remote Sensing. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, 7 (2): 521-542. <https://doi.org/10.1109/JSTARS.2013.2269733>
- Bocko Y. E., Dargie G., Ifo S. A., Yoka J., Loumeto J. J., 2016. Répartition spatiale de la richesse floristique des forêts marécageuses de la Likouala, Nord-Congo. *Afrique Science*, 12 (4) : 200-212.
- Bocko Y. E., Ifo S. A., Loumeto J. J., 2017. Quantification des stocks de carbone de trois pools clés de carbone en Afrique centrale : cas de la forêt marécageuse de La Likouala (Nord Congo). *European Scientific Journal*, 13 (5) : 438-456. <https://doi.org/10.19044/esj.2017.v13n5p438>
- Bonnefille R., Chalief F., 2000. Pollen-inferred precipitation time-series from equatorial mountains, Africa, the last 40 kyr BP. *Global and Planetary Change*, 26: 25-50. [https://doi.org/10.1016/S0921-8181\(00\)00032-1](https://doi.org/10.1016/S0921-8181(00)00032-1)
- Bouillon S., Yambélé A., Gillikin D. P., Teodoru C., Darchambeau F., Lambert T., *et al.*, 2014. Contrasting biogeochemical characteristics of the Oubangui River and tributaries (Congo River basin). *Scientific Reports*, 4: 5402. <https://doi.org/10.1038/srep05402>
- Brcnic T. M., Willis K. J., Harris D. J., Telfer M. W., Bailey R. M., 2009. Fire and climate change impacts on lowland forest composition in northern Congo during the last 2,580 years from palaeoecological analyses of a seasonally flooded swamp. *Holocene*, 19: 79-89. <https://doi.org/10.1177/0959683608098954>
- Brcnic T. M., Willis K. J., Harris D. J., Washington R., 2007. Culture or climate? The relative influences of past processes on the composition of the lowland Congo rainforest. *Philosophical Transactions of the Royal Society B-Biological Sciences*, 362: 229-242. <https://doi.org/10.1098/rstb.2006.1982>
- Bwangoy J.-R. B., Hansen M. C., Roy D. P., De Grandi G., Justice C. O., 2010. Wetland mapping in the Congo Basin using optical and radar remotely sensed data and derived topographical indices. *Remote Sensing of Environment*, 114: 73-86. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2009.08.004>
- Carr A. B., Trigg M. A., Tshimanga R. M., Borman D. J., Smith M. W., 2019. Greater water surface variability revealed by new Congo River field data: Implications for satellite altimetry measurements of large rivers. *Geophysical Research Letters*, 46: 8093-8101. <https://doi.org/10.1029/2019GL083720>
- Climate Watch, 2019. Global Historical Emissions. Washington, DC, USA, World Resources Institute, online observatory. https://www.climatewatchdata.org/ghg-emissions?end_year=2016&start_year=1990 (date accessed: October 2020).
- Cobb A. R., Dommain R., Tan F., Heng N. H. E., Harvey C. F., 2020. Carbon storage capacity of tropical peatlands in natural and artificial drainage networks. *Environmental Research Letters*, 15: 114009. <https://dx.doi.org/10.1088/1748-9326/aba867>
- Cobb A. R., Hoyt A. M., Gandois L., Eri J., Dommain R., Salim K. A., *et al.*, 2017. How temporal patterns in rainfall determine the geomorphology and carbon fluxes of tropical peatlands. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 114: E5187-E5196. <https://doi.org/10.1073/pnas.1701090114>
- Cole L. E. S., Willis K. J., Bhagwat S. A., 2021. The future of Southeast Asia's tropical peatlands: Local and global perspectives. *Anthropocene*, 34: 100292. <https://doi.org/10.1016/j.ancene.2021.100292>
- Cooper H. V., Evers S., Aplin P., Crout N., Dahalan M. P. B., Sjögersten S., 2020. Greenhouse gas emissions resulting from conversion of peat swamp forest to oil palm plantation. *Nature Communications*, 11: 407. <https://doi.org/10.1038/s41467-020-14298-w>
- Couwenberg J., Dommain R., Joosten H., 2010. Greenhouse gas fluxes from tropical peatlands in south-east Asia. *Global Change Biology*, 16 (6): 1715-1732. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2486.2009.02016.x>
- Creese A., Washington R., Jones R., 2019. Climate change in the Congo Basin: processes related to wetting in the December-February dry season. *Climate Dynamics*, 53: 3583-3602. <https://doi.org/10.1007/s00382-019-04728-x>
- Dargie G. C., Lawson I. T., Rayden T. J., Miles L., Mitchard E. T. A., Page S. E., *et al.*, 2019. Congo Basin peatlands: threats and conservation priorities. *Mitigation and Adaptation Strategies for Global Change*, 24 (4): 669-686. <https://doi.org/10.1007/s11027-017-9774-8>
- Dargie G., Lewis S., Lawson I., Mitchard E. T. A., Page S. E., Bocko Y. E., *et al.*, 2017. Age, extent and carbon storage of the central Congo Basin peatland complex. *Nature*, 542: 86-90. <https://doi.org/10.1038/nature21048>
- Davenport I. J., McNicol I., Mitchard E. T. A., Dargie G. C., Ifo S. A., Milongo B., *et al.*, 2020. First Evidence of Peat Domes in the Congo Basin using LiDAR from a Fixed-Wing Drone. *Remote Sensing*, 12 (14): 2196. <https://doi.org/10.3390/rs12142196>
- Dosio A., Jones R. G., Jack C., Lennard C., Nikulin G., Hewitson B., 2019. What can we know about future precipitation in Africa? Robustness, significance and added value of projections from a large ensemble of regional climate models. *Climate Dynamics*, 53: 5833-5858. <https://doi.org/10.1007/s00382-019-04900-3>
- Elanga H., Schwartz D., Vincens A., 1994. Pollen evidence of late Quaternary vegetation and inferred climate changes in Congo. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 109: 345-356. [https://doi.org/10.1016/0031-0182\(94\)90184-8](https://doi.org/10.1016/0031-0182(94)90184-8)
- Elanga H., de Namurb C., Vincensa A., Rouxb M., Schwartz D., 2000. Use of plots to define pollen-vegetation relationships in densely forested ecosystems of Tropical Africa. *Review of Palaeobotany and Palynology*, 112: 79-96. [https://doi.org/10.1016/S0034-6667\(00\)00036-1](https://doi.org/10.1016/S0034-6667(00)00036-1)
- Elanga H., Vincens A., Schwartz D., Fabing A., Bertaux J., Wirrmann D., *et al.*, 2001. Le marais estuarien de la Songolo (Sud Congo) à l'Holocène moyen et récent. *Bulletin de la Société Géologique de France*, 172 : 359-366. <https://doi.org/10.2113/172.3.359>
- Evrard C., 1968. Recherches écologiques sur le peuplement forestier des sols hydromorphes de la Cuvette centrale congolaise. Bruxelles, Belgique, Publications de l'Institut national pour l'étude agronomique du Congo (INEAC), Série scientifique, n° 110, 295 p.
- Farmer J., Matthews R., Smith J. U., Smith P., Singh B. K., 2011. Assessing existing peatland models for their applicability for modelling greenhouse gas emissions from tropical peat soils. *Current Opinion in Environmental Sustainability*, 3 (5): 339-349. <https://doi.org/10.1016/j.cosust.2011.08.010>
- Gallego-Sala A. V., Charman D. J., Brewer S., Page S. E., Prentice I. C., Friedlingstein P., *et al.*, 2018. Latitudinal limits to the predicted increase of the peatland carbon sink with warming. *Nature Climate Change*, 8: 907-913. <https://doi.org/10.1038/s41558-018-0271-1>
- Garcin Y., Deschamps P., Ménot G., de Saulieu G., Schefuss E., Sebag D., *et al.*, 2018. Early anthropogenic impact on Western Central African rainforests 2,600 y ago. *PNAS*, 115 (13): 3261-3266. <https://doi.org/10.1073/pnas.1715336115>
- Giresse P., Maley J., Chepstow-Lusty A., 2020. Understanding the 2,500 yr BP rainforest crisis in West and Central Africa in the

- framework of the Late Holocene: Pluridisciplinary analysis and multi-archive reconstruction. *Global and Planetary Change*, 192: 103257. <https://doi.org/10.1016/j.gloplacha.2020.103257>
- Girkin N. T., Turner B. L., Ostle N., Craighan J., Sjögersten S., 2018. Root exudate analogues accelerate CO₂ and CH₄ production in tropical peat. *Soil Biology and Biochemistry*, 117: 48-55. <https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2017.11.008>
- Girkin N. T., Vane C. H., Turner B. L., Ostle N. J., Turner B. L., Sjögersten S., 2020. Root oxygen mitigates methane fluxes in tropical peatlands. *Environmental Research*, 15: 064013. <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1748-9326/ab8495>
- Gumbricht T., Roman-Cuesta R. M., Verchot L., Herold M., Wittmann F., Householder E., et al., 2017. An expert system model for mapping tropical wetlands and peatlands reveals South America as the largest contributor. *Global Change Biology*, 23 (9): 3581-3599. <https://doi.org/10.1111/gcb.13689>
- Haraguchi A., 2016. Discharged Sulfuric Acid from Peatland to River System. In: Osaki M., Tsuji N. (eds). *Tropical Peatland Ecosystems*. Tokyo, Japan, Springer, 297-311. https://doi.org/10.1007/978-4-431-55681-7_19
- Hatano R., Toma Y., Hamada Y., Arai H., Susilawati H. L., Inubushi K., 2016. Methane and Nitrous Oxide Emissions from Tropical Peat Soil. In: Osaki M., Tsuji N. (eds). *Tropical Peatland Ecosystems*. Tokyo, Japan, Springer, 339-351. https://doi.org/10.1007/978-4-431-55681-7_22
- Hubau W., Van den Bulcke J., Kitin P., Mees F., Baert G., Verschuren D., et al., 2013. Ancient charcoal as a natural archive for paleofire regime and vegetation change in the Mayumbe, Democratic Republic of the Congo. *Quaternary Research*, 80 (2): 326-340. <https://doi.org/10.1016/j.yqres.2013.04.006>
- Hubau W., Van den Bulcke J., Van Acker J., Beeckman H., 2015. Charcoal-inferred Holocene fire and vegetation history linked to drought periods in the Democratic Republic of Congo. *Global Change Biology*, 21 (6): 2296-2308. <https://doi.org/10.1111/gcb.12844>
- Hubau W., Lewis S. L., Phillips O. L., Affum-Baffoe K., Beeckman H., Cuní-Sánchez A., et al., 2020. Asynchronous carbon sink saturation in African and Amazonian tropical forests. *Nature*, 579: 80-87. <https://doi.org/10.1038/s41586-020-2035-0>
- Hughes R. H., Hughes J. S., 1992. *A Directory of African Wetlands*. Cambridge, UK, IUCN, 820 p. <https://www.iucn.org/content/a-directory-african-wetlands>
- Inogwabini B., Nzala A. B., Bokika J. C., 2013. People and bonobos in the southern Lake Tumba landscape, Democratic Republic of Congo. *American Journal of Human Ecology*, 2 (2): 44-53. https://worldscholars.org/index.php/ajhe/article/view/0202_1
- Jung H. C., Hamski J., Durand M., Alsdorf D. E., Hossain F., Lee H., et al., 2010. Characterization of complex fluvial systems using remote sensing of spatial and temporal water level variations in the Amazon, Congo, and Brahmaputra Rivers. *Earth Surface Processes and Landforms*, 35: 294-304. <https://doi.org/10.1002/esp.1914>
- Kelly T. J., Lawson I. T., Roucoux K. H., Baker T. R., Coronado E. N. H., 2020. Patterns and drivers of development in a west Amazonian peatland during the late Holocene. *Quaternary Science Reviews*, 230: 106168. <https://doi.org/10.1016/j.quascirev.2020.106168>
- Kim D., Lee H., Laraque A., Tshimanga R. M., Jung H. C., Beighley E., et al., 2017. Mapping spatio-temporal water level variations over the central Congo River using PALSAR ScanSAR and Envisat altimetry data. *International Journal of Remote Sensing*, 38 (23): 7021-7040. <https://doi.org/10.1080/01431161.2017.1371867>
- Kopplitz S. N., Mickley L. J., Marlier M. E., Buonocore J. J., Kim P. S., Liu T., et al., 2016. Public health impacts of the severe haze in Equatorial Asia in September-October 2015: Demonstration of a new framework for informing fire management strategies to reduce downwind smoke exposure. *Environmental Research Letters*, 11 (9): 094023. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/11/9/094023>
- Kurnianto S., Warren M., Talbot J., Kauffman B., Murdiyarto D., Frohling S., 2015. Carbon accumulation of tropical peatlands over millennia: a modeling approach. *Global Change Biology*, 21 (1): 431-444. <https://doi.org/10.1111/gcb.12672>
- Le Monde/AFP, 2019. Découverte de pétrole onshore au Congo. *Le Monde Afrique*, 12 août. https://www.lemonde.fr/afrique/article/2019/08/12/decouverte-de-petrole-onshore-au-congo_5498706_3212.html (date accessed: 29 October 2020).
- Lebrun J., Gilbert G., 1954. Une classification écologique des forêts du Congo. Bruxelles, Belgique, Institut national pour l'étude agronomique du Congo belge (INEAC), 89 p.
- Lee H., Beighley R. E., Alsdorf D., Jung H. C., Shum C. K., Duan J., et al., 2011. Characterization of terrestrial water dynamics in the Congo Basin using GRACE and satellite radar altimetry. *Remote Sensing of Environment*, 115: 3530-3538. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2011.08.015>
- Lee H., Yuan T., Jung H. C., Beighley E., 2015. Mapping wetland water depths over the central Congo Basin using PALSAR ScanSAR, Envisat altimetry, and MODIS VCF data. *Remote Sensing of Environment*, 159: 70-79. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2014.11.030>
- Loisel J., Gallego-Sala A. V., Amesbury M. J., Magnan G., Anshari G., Beilman D. W., et al., 2021. Expert assessment of future vulnerability of the global peatland carbon sink. *Nature Climate Change*, 11: 70-77. <https://doi.org/10.1038/s41558-020-00944-0>
- Lunt M. F., Palmer P. I., Feng L., Taylor C. M., Boesch H., Parker R. J., 2019. An increase in methane emissions from tropical Africa between 2010 and 2016 inferred from satellite data. *Atmospheric Chemistry and Physics Discussions*, 19: 14721-14740. <https://doi.org/10.5194/acp-19-14721-2019>
- Miettinen J., Shi C., Liew S. C., 2016. Land cover distribution in the peatlands of Peninsular Malaysia, Sumatra and Borneo in 2015 with changes since 1990. *Global Ecology and Conservation*, 6: 67-78. <https://doi.org/10.1016/j.gecco.2016.02.004>
- Miettinen J., Shi C., Liew S. C., 2017. Fire distribution in Peninsular Malaysia, Sumatra and Borneo in 2015 with special emphasis on peatland fires. *Environmental Management*, 60 (4): 747-757. <https://doi.org/10.1007/s00267-017-0911-7>
- Miles L., Ravilious C., García-Rangela S., de Lamoia X., Dargie G., Lewis S., 2017. Carbone, biodiversité et utilisation des terres dans les tourbières de la Cuvette centrale du Congo. Cambridge, UK, UN Environment World Conservation Monitoring Centre, 12 p. <https://www.unredd.net/documents/global-programme-191/multiple-benefits/studies-reports-and-publications-1364/16502-carbone-biodiversite-et-utilisation-des-terres-dans-les-tourbieres-de-la-cuvette-centrale-du-congo-hi-gh-res-fr.html?path=global-programme-191/multiple-benefits/studies-reports-and-publications-1364>
- NASA, 2020. SWOT Surface Water and Topography. <https://swot.jpl.nasa.gov/> (date accessed: 29 October 2020).
- Niang I., Ruppel O. C., Abdrabo M. A., Essel A., Lennard C., Padgham J., et al., 2014. Africa. In: Barros V. R., Field C. B., Dokken D. J., Mastrandrea M. D., Mach K. J., Bilir T. E., et al. (eds). *Climate Change 2014: Impacts, Adaptation, and Vulnerability. Part B: Regional Aspects. Contribution of Working Group II to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge, UK and New York, USA, Cambridge University Press, 1199-1265.
- Nicholson S. E., Klotter D., Zhou L., Hua W., 2019. Validation of Satellite Precipitation Estimates over the Congo Basin. *Journal of Hydrometeorology*, 20: 631-656. <https://doi.org/10.1175/JHM-D-18-0118.1>

- Page S. E., Rieley J. O., Banks C. J., 2011. Global and regional importance of the tropical peatland carbon pool. *Global Change Biology*, 17: 798-818. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2486.2010.02279.x>
- Pangala S. R., Enrich-Prast A., Basso L. S., Peixoto R. B., Bastviken D., Hornibrook E. R. C., *et al.*, 2017. Large emissions from floodplain trees close the Amazon methane budget. *Nature*, 552: 230-234. <https://doi.org/10.1038/nature25191>
- Parish F., Sirin A., Charman D., Joosten H., Minayeva T., Silvius M., *et al.* (eds), 2008. Assessment on Peatlands, Biodiversity and Climate Change: Main Report. Global Environment Centre, Kuala Lumpur and Wetlands International, Wageningen, 206 p. <https://www.eli.org/national-wetlands-newsletter/assessment-peatlands-biodiversity-and-climate-change> http://www.imcg.net/media/download_gallery/books/assessment_peatland.pdf
- Pärn J., Verhoeven J. T. A., Butterbach-Bahl K., Dise N. B., Ullah S., Aasa A., *et al.*, 2018. Nitrogen-rich organic soils under warm well-drained conditions are global nitrous oxide emission hotspots. *Nature Communications*, 9 (1): 1135. <https://doi.org/10.1038/s41467-018-03540-1>
- Qiu C., Zhu D., Ciais P., Guenet B., Peng S., Krinner G., *et al.*, 2019. Modelling northern peatland area and carbon dynamics since the Holocene with the ORCHIDEE-PEAT land surface model (SVN r5488). *Geoscientific Model Development*, 12: 2961-2982. <https://doi.org/10.5194/gmd-12-2961-2019>
- Rainey H. J., Iyenguet F. C., Malanda G.-A. F., Madzoke B., Dos Santos D., Stokes E. J., *et al.*, 2010. Survey of *Raphia* swamp forest, Republic of Congo, indicates high densities of Critically Endangered western lowland gorillas *Gorilla gorilla gorilla*. *Oryx*, 44: 124-132. <https://doi.org/10.1017/S003060530999010X>
- Riley J., Huchzermeyer F. W., 1999. African dwarf crocodiles in the Likouala swamp forests of the Congo Basin: Habitat, density, and nesting. *Copeia*, 1999 (2): 313-320. <https://www.jstor.org/stable/1447477>
- Rosenqvist Å., Birkett C. M., 2002. Evaluation of JERS-1 SAR mosaics for hydrological applications in the Congo river basin. *International Journal of Remote Sensing*, 23 (7): 1283-1302. <https://doi.org/10.1080/01431160110092902>
- Samba G., Nganga D., 2012. Rainfall variability in Congo-Brazzaville: 1932-2007. *International Journal of Climatology*, 32: 854-873. <https://doi.org/10.1002/joc.2311>
- Schefuss E., Eglinton T., Spencer-Jones C., *et al.*, 2016. Hydrologic control of carbon cycling and aged carbon discharge in the Congo River basin. *Nature Geoscience*, 9: 687-690. <https://doi.org/10.1038/ngeo2778>
- Schulz C., Martín Brañas M., Nuñez Pérez C., Del Aguila Villacorta M., Laurie N., Lawson I. T., *et al.*, 2019. Uses, cultural significance, and management of peatlands in the Peruvian Amazon: Implications for conservation. *Biological Conservation*, 235: 189-198. <https://doi.org/10.1016/j.biocon.2019.04.005>
- Sumarga E., Hein L., Hooijer A., Vernimmen R., 2016. Hydrological and economic effects of oil palm cultivation in Indonesian peatlands. *Ecology and Society*, 21 (2): 52. <http://dx.doi.org/10.5751/ES-08490-210252>
- Tathy J. P., Cros B., Delmas R. A., Marenco A., Servant J., Labat, M., 1992. Methane emission from flooded forest in central Africa. *Journal of Geophysical Research*, 97 (D6): 6159-6168. <https://doi.org/10.1029/90JD02555>
- Tovar I. C., 2015. Central African Lowland Forest Resilience to Fire Disturbance and Climate Change: Answers from the Past. PhD thesis, University of Oxford, Oxford, UK, 187 p. <https://ethos.bl.uk/OrderDetails.do?uin=uk.bl.ethos.712422>
- Tovar C., Harris D. J., Breman E., Brncic T., Willis K. J., 2019. Tropical monodominant forest resilience to climate change in Central Africa: A *Gilbertiodendron dewevrei* forest pollen record over the past 2,700 years. *Journal of Vegetation Science*, 30 (3): 575-586. <https://doi.org/10.1111/jvs.12746>
- United Nations Environment Programme, 2018. Declaration de Brazzaville. Third Meeting of the Partners of the Global Peatlands Initiative, Brazzaville, 23 March 2018, 10 p. <https://www.unep.org/fr/node/21464>
- Washington R., James R., Pearce H., Pokam W. M., Moufouma-Okia W., 2013. Congo Basin rainfall climatology: can we believe the climate models? *Philosophical Transactions of the Royal Society B-Biological Sciences*, 368: 20120296. <http://doi.org/10.1098/rstb.2012.0296>
- World Bank, 2016. The cost of fire: An economic analysis of Indonesia's 2015 fire crisis. Indonesia Sustainable Landscapes Knowledge Note No. 1. Jakarta, Indonesia, World Bank, 12 p. <https://openknowledge.worldbank.org/handle/10986/23840>
- WCS, 2019a. Days per week hh collect natural resources per landscape Lac Télé [data file]. Available from: CARPE Open Data Portal. https://carpe-worldresources.opendata.arcgis.com/datasets/e1aa6275b70a42d49c142e791460309b_2 (date accessed: 29 October 2020).
- WCS, 2019b. Days per week hh collect natural resources per landscape Salonga-Lukenie-Sankuru [data file]. Available from: CARPE Open Data Portal. https://carpe-worldresources.opendata.arcgis.com/datasets/b40b920dbfca4ff09e6c44e9e45b9935_2 (date accessed: 29 October 2020).
- Xu J., Morris P. J., Junguo L., Holden J., 2018. PEATMAP: Refining estimates of global peatland distribution based on a meta-analysis. *Catena*, 160: 134-140. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2017.09.010>
- Yu Z., Loisel J., Brosseau D. P., Beilman D. W., Hunt S. J., 2010. Global peatland dynamics since the Last Glacial Maximum. *Geophysical Research Letters*, 37 (13): L13402. <https://doi.org/10.1029/2010GL043584>
- Yuan T., Lee H., Jung H. C., Aierken A., Beighley E., Alsdorf D. E., *et al.*, 2017. Absolute water storages in the Congo River floodplains from integration of InSAR and satellite radar altimetry. *Remote Sensing of Environment*, 201: 57-72. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2017.09.003>

Biddulph *et al.* – Contribution des auteurs

Rôle du contributeur

Noms des auteurs

Visualisation

G. E. Biddulph, Y. E. Bocko, P. Bola, B. Crezee, G. C. Dargie, O. Emba, S. Georgiou, N. Girkin, D. Hawthorne, J. Jovani Sancho, J. Kanyama T., W. E. Mampouya, M. Mbemba, M. Sciumbata, G. Tyrrell

Écriture – Préparation de l'ébauche originale

G. E. Biddulph, Y. E. Bocko, P. Bola, B. Crezee, G. C. Dargie, O. Emba, S. Georgiou, N. Girkin, D. Hawthorne, J. Jovani Sancho, J. Kanyama T., W. E. Mampouya, M. Mbemba, M. Sciumbata, G. Tyrrell

Écriture – Révision et édition

G. C. Dargie, Y. E. Bocko, N. Girkin

Bois et Forêts des Tropiques - Revue scientifique du Cirad -
© Bois et Forêts des Tropiques © Cirad



Cirad - Campus international de Baillarguet,
34398 Montpellier Cedex 5, France
Contact : bft@cirad.fr - ISSN : L-0006-579X