

ETUDE COMPARATIVE DU FONCTIONNEMENT HYDROLOGIQUE DANS DEUX BASSINS-VERSANTS ANTHROPISES EN AFRIQUE DE L'OUEST

AMOUSSOU E.^{1,2}, TOTIN VODOUNON S.H.^{1,2}, KOUADIO K.C.A.^{3,7}, OBAHOUNDJÉ S.³, KOUAME Y.M.^{6,7}, DIEDHIOU A.⁴, MAHE G.⁵, HOUNDENOU C.², BOKO M.²

1 Département de Géographie, Université de Parakou, Parakou, Bénin (ajernest@yahoo.fr ; ernestamoussou@gmail.com)

2 Laboratoire Pierre PAGNEY, Climat, Eau, Ecosystème et Développement (LACEEDE), Université d'Abomey-Calavi, Cotonou, Bénin

3 LAPA-MF : Centre d'Excellence Changement Climatique, Biodiversité et Agriculture durable (CEA CCBAD), Université Houphouët-Boigny d'Abidjan, Abidjan, Côte d'Ivoire

4 IRD, Laboratoire LTRE de l'Université de Grenoble-Alpes, Grenoble, France

5 Laboratoire d'HydroSciences de Montpellier, Université de Montpellier 2, Montpellier, France

6 UFR-Environnement, Université Jean Lorougnon Guédé, Daloa, Côte d'Ivoire

7 Laboratoire Géosciences et Environnement (SGE), Université Nangui Abrogoua (UNA), Abidjan, Côte d'Ivoire

Résumé : L'objectif de cette étude est d'analyser l'évolution des écoulements dans les deux bassins aménagés pour mieux apprécier la dynamique des barrages de Nangbéto et de Kossou respectivement sur les fleuves Mono et Bandama. Les données utilisées sont celles des pluies spatiales des deux bassins à l'exutoire de Nangbéto et de Kossou, des débits entrant et sortant de Nangbéto et de Kossou. Le coefficient d'écoulement a permis d'apprécier les effets des lâchers à Nangbéto et à Kossou, et l'effet des précipitations. Les résultats obtenus montrent dans les deux bassins-versants, que les écoulements sont devenus « artificiels » depuis la mise en eau des barrages. Les débits d'étiage sont soutenus par les lâchers d'eau. Ainsi, ils ont augmenté de plus de 86 % contrairement aux débits de crues qui ont connu une diminution de 47 % sur le bassin du Mono à Nangbéto et de 97 % sur le bassin de Bandama à Kossou. De plus, avec la mise en eau du barrage, le coefficient d'écoulement a augmenté en moyenne de 30 % (Nangbéto) et 13 % (Kossou) dans les bassins comparativement à l'état naturel. Toutefois, son évolution est fonction de la quantité de lames d'eau précipitée dans le bassin.

Mots clés : Mono ; Bandama ; bassin-versant anthropisé ; fonctionnement hydrologique ; barrage hydroélectrique

Summary: Comparative study of hydrological functioning in two anthropised watersheds in West Africa. The objective of this study is to analyze the evolution of flows in the two basins developed to better appreciate the dynamics of the Nangbéto and Kossou dams on the Mono and Bandama rivers respectively. The data used are those of space rains from the two basins at the outlet of Nangbéto and Kossou, flows entering and leaving Nangbéto and Kossou. The flow coefficient made it possible to appreciate the effects of releases in Nangbéto and Kossou, and the effect of precipitation. The results obtained show in the two watersheds that the flows have become "artificial" since the impoundment of the dams. The low water flows are supported by the water releases. Thus, they increased by more than 86% unlike the flood flows which experienced a decrease of 47% in the Mono basin in Nangbéto and 97% in the Bandama basin in Kossou. In addition, with the impoundment of the dam, the flow coefficient increased on average by 30% (Nangbéto) and 13% (Kossou) in the basins compared to the natural state. However, its evolution is a function of the quantity of blades of water precipitated in the basin.

Key words: Mono; Bandama; anthropized watershed; hydrological function; hydroelectric dam

Introduction

Le réchauffement climatique est un phénomène planétaire, et presque toute l'Afrique n'échappe pas à ses conséquences (IPCC, 2007 ; Amoussou, 2010). Ainsi, suite aux épisodes de sécheresse des années 1970 et 1980 en Afrique de l'Ouest, des milliers de petits et moyens barrages ont été édifiés dans beaucoup de bassins-versants, dans le but de pérenniser la ressource en eau. Ainsi, il s'est agi de stocker l'eau pour faire de la production agricole, d'où les barrages hydroagricoles. Mais, suite à l'insuffisance de la production électrique dans certains pays, certains fleuves ont connu en plus de leurs barrages hydroagricoles, l'installation des barrages hydroélectriques en amont : c'est le cas des fleuves Mono (Bénin-Togo) et Bandama (Côte d'Ivoire).

Les barrages hydroélectriques sont considérés comme de véritables atouts pour le développement socio-économique (Amoussou, 2010 ; Korkovelos *et al.*, 2018). Ils sont utilisés pour l'hydroélectricité, l'eau potable, l'agriculture, la pêche et l'élevage (Anoh *et al.*, 2017). Mais, les études antérieures menées par Amoussou (2010) et Amoussou *et al.* (2012) dans le bassin du Mono ont montré que la disponibilité des ressources en eau est liée à la distribution spatio-temporelle de la variabilité climatique. Ainsi, dans les deux bassins-versants, les débits varient aussi bien dans le temps que dans l'espace. Les réservoirs d'eau des lacs de retenue formés par ces barrages sont influencés par les variations pluviométriques, rendant difficile leur exploitation rationnelle (Konan *et al.*, 2013). A cet effet, la maîtrise des ressources en eau d'un bassin nécessite une connaissance approfondie des processus hydrologiques (Singh et Woolhiser, 2002 ; Amoussou *et al.*, 2012).

Les barrages hydroélectriques de Nangbéto et de Kossou mis en eau respectivement en septembre 1987 et novembre 1972, contribuent à fournir de l'énergie électrique pour trois pays (Bénin, Togo et Côte d'Ivoire) ouest africains dans le but de renforcer l'existant. Mais, cela a bouleversé le fonctionnement hydrologique des fleuves en aval des barrages. Or, dans le contexte de la gestion intégrée des ressources en eau (GIRE), une meilleure connaissance de la dynamique hydroclimatique des bassins versants est nécessaire. Le but de cette étude est d'analyser la variation des écoulements dans les deux bassins aménagés pour mieux apprécier le fonctionnement hydrologique de chaque barrage suite à ses lâchers d'eau.

1. Zone d'étude

Cette étude faite en Afrique de l'Ouest porte sur les barrages hydroélectriques de Nangbéto (Mono) et de Kossou (Bandama) (Fig.1). Ils sont tous situés sur des bassins côtiers drainant des eaux du nord vers l'océan Atlantique (sud). Ces barrages bénéficient d'un climat de type soudanien caractérisé par un régime pluviométrique unimodal qui gouverne le fonctionnement hydrologique à régime tropical dans les bassins du Mono (21500 km²) et de Bandama (32400 km²). Cependant, la partie sud du bassin est arrosé par un climat subéquatorial à régime pluviométrique bimodal, dont leur influence ne sont pas négligeables pendant les périodes de hautes eaux.

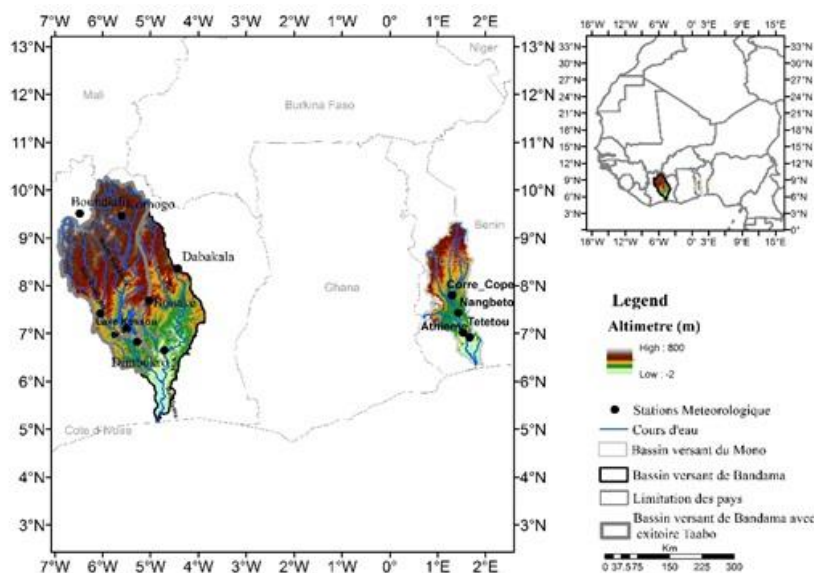


Figure 1. Location des deux bassins anthropiques

Les actions conjuguées des lâchers d'eau des bassins avec les précipitations au sud engendrent les récurrentes inondations enregistrées dans la basse vallée des bassins-versants.

Les deux hydrosystèmes sont installés sur deux formations géologiques : le grès sédimentaire et le socle cristallin, ce dernier étant la formation dominante, sur laquelle se trouve les retenues des barrages de Nangbéto (180 km²) et de Kossou (1700 km²). La présence des ressources en eau a entraîné une surexploitation des unités paysagiques des bassins avec une forte érosivité, augmentant le ruissellement et les apports terrigènes dans les hydrosystèmes, contribuant au comblement de la basse vallée du complexe.

2. Données et méthodes

Les données utilisées sont extraites de la base de données de l'Agence Météo-Bénin, de la Direction de Météorologie de Lomé, de la Société d'Exploitation de Développement Aéroportuaire Aéronautique Météo (SODEXAM) d'Abidjan et des services hydrologiques des trois pays. Il s'agit des précipitations, de l'évapotranspiration, des débits (bruts et turbinés) et de la production électrique. Ces données couvrent la période de 1980 à 2014 pour le bassin de Bandama à Kossou et de 1988 à 2016 pour le bassin du Mono à Nangbéto. Elles ont permis de faire le traitement statistique, en comparant les écoulements de surface à l'entrée et à la sortie des barrages. Dans le bassin de Bandama à Kossou, 33 stations pluviométriques ont été utilisées contre 17 stations sur le bassin du Mono à Nangbéto. Ces données ont été krigées par bassin pour avoir le champ de pluie qui a servi au traitement des données pluviométriques pour analyse.

3. Résultats et discussion

3.1. Variation mensuelle pluie/débit

La figure 2 présente la variation mensuelle pluie/débit dans les bassins-versants des fleuves Mono (barrage Nangbéto) de 1988-2016 et Bandama (barrage Kossou) de 1980-2014.

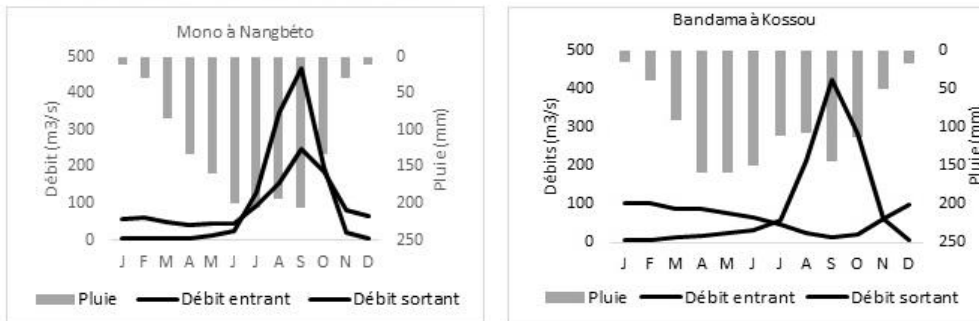


Figure 2. Variation mensuelle pluie/débit à Nangbéto (Mono) et à Kossou (Bandama)

Il ressort de l'analyse de la figure 2, que les forts débits coïncident avec les fortes pluies du domaine tropical dont le maximum est enregistré en août ou septembre. Par contre, les maximums d'avril-mai à Bandama contribuent à remplir le réservoir en place, en attendant la descente des eaux du domaine tropical pour faire le trop-plein de la retenue. Ce qui va engendrer les crues observées. De plus, avec la mise en eau du barrage, les débits d'étiage ont considérablement augmenté de 79 % à la sortie du barrage de Kossou contre 86 % à la sortie de Nangbéto. Ainsi, le mois le plus sec (janvier) des deux bassins a connu une augmentation de son débit de 93 % pour Nangbéto et 95 % pour Kossou. Ces résultats corroborent avec ceux de Amoussou (2010) et Kouamé *et al.* (2019) confirmant le rôle joué par les lâchers d'eau dans le fonctionnement hydrologique des bassins-versants en aval des barrages. Ainsi, avec la mise en eau du barrage, l'écoulement est dit "artificiel" du fait de la modification de l'écoulement naturel.

Par contre, l'installation des barrages a engendré une diminution des crues en aval, mais très marquée à Kossou (97 %) qu'à Nangbéto (47 %). Ceci pourrait s'expliquer par le sous-dimensionnement du barrage de Kossou. Ainsi, on note une différence plus marquée entre les débits maximums d'entrée et de sortie à Kossou (31 %) qu'à Nangbéto (7.5 %) comme le confirme la figure 3.

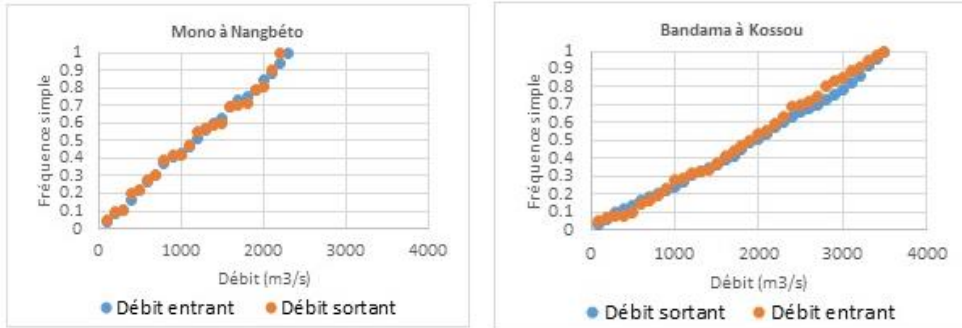


Figure 3. Evolution fréquentielle des débits maximums d'entrée et de sortie des deux barrages

Il résulte également de la figure 3, que la grande capacité du barrage de Kossou comparativement à celui de Nangbéto, où le débit entrant est presque égal au débit sortant. Cette faible capacité de la retenue de Nangbéto, explique les récurrentes ouvertures des vannes pendant les périodes de hautes eaux sur le fleuve Mono entre septembre-octobre.

3.2. Variation du coefficient d'écoulement

La figure 4 présente le coefficient d'écoulement (CE) dans les deux bassins-versants à l'entrée et à la sortie des barrages. Il traduit la capacité de ruissellement du bassin. Ce coefficient est étroitement lié à des variations climatiques et traduit la relation entre les pluies et les écoulements (Mahé et Olivry, 1995). Il permet aussi d'analyser le rôle joué par le substratum géologique du bassin considéré. Ainsi, de l'analyse de la figure 4, il ressort une augmentation des écoulements à la sortie des barrages (Nangbéto : 29.93 % contre 11.39 % et Kossou : 13.08 % contre 7.26 %). Ces faibles valeurs au niveau de Kossou confirment le caractère sous-dimensionné du barrage avec de faible débit moyen de sortie de 66.37 m³/s contre 95.85 m³/s à l'entrée soit 29.48 m³/s de différence. Par contre, à Nangbéto, le débit moyen à l'entrée est de 101.87 m³/s contre 94.22 m³/s soit une différence de 7.65 m³/s.

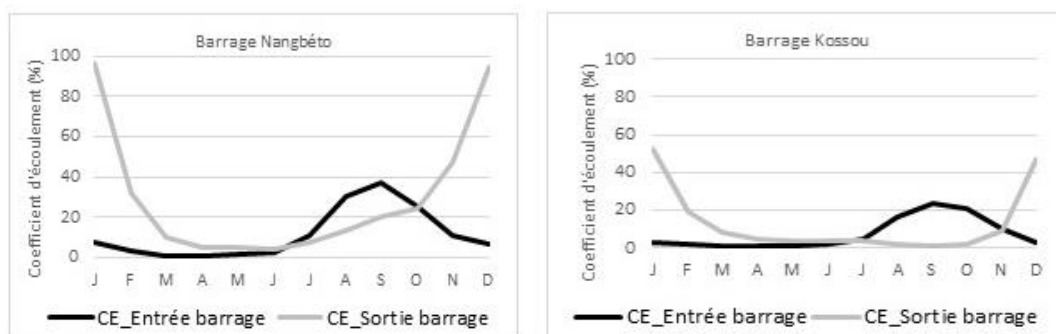


Figure 4. Variation mensuelle du coefficient d'écoulement dans les deux bassins-versants

L'augmentation du coefficient d'écoulement à la sortie de Nangbéto et de Kossou est significative au seuil de 1 % d'erreur. Or, on devrait s'attendre à une diminution du fait de la forte évapotranspiration potentielle, de la forte évaporation du stock d'eau et de la baisse pluviométrique. Ce qui confirme que le fonctionnement hydrologique en aval des barrages dans

les bassins du Mono et de Bandama dépend non seulement des lâchers d'eau du barrage, mais aussi de la répartition de la variation des lames d'eau précipitées et de la dynamique d'occupation des terres autour du barrage, comme l'avait aussi souligné Amoussou (2010).

3.3. Production énergétique (PE) dans les deux barrages hydroélectriques

La figure 5 illustre la variabilité annuelle de la production électrique à Nangbéto (1988-2016) et à Kossou (1981-2014) en fonction des débits turbinés. Il ressort de l'analyse de la figure 5 que les productions électriques sont en baisse dans les deux bassins, plus marqué à Kossou qu'à Nangbéto. Cette baisse est en partie liée à la baisse des débits turbinés. Toutefois, les forts débits turbinés ne produisent pas toujours une forte production électrique. Cependant, ils ne sont pas sans influence, car dans le bassin de Nangbéto, les années sèches produisent une baisse considérable de l'énergie. Ainsi, en 2015 avec un débit turbiné de 44 m³/s, le barrage a produit 56 GWh contre 167 GWh en moyenne.

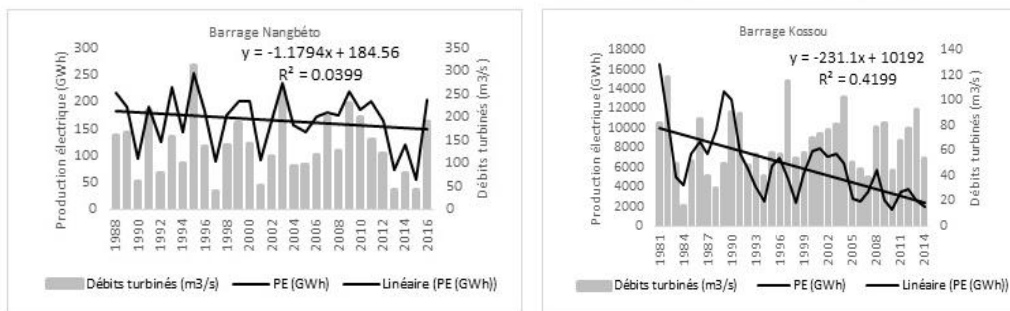


Figure 5. Evolution de la production électrique à Nangbéto et à Kossou

De plus de 2014 à 2015, le déficit du débit turbiné de 44 % a engendré un déficit de 53 % dans la production électrique à Nangbéto. Par contre le déficit de débit turbiné de 42 % entre 2013-2014 à Kossou a engendré seulement un déficit de la production électrique de 24 %. Ceci témoigne de la grande capacité de stockage d'eau du réservoir contrairement à celle de Nangbéto. Ce qui fait que les années de forts débits turbinés ne s'accompagnent pas toujours de forte production d'électricité dans le bassin de Bandama à Kossou contrairement dans le bassin du Mono à Nangbéto (Fig.5), où les fortes productions électriques sont enregistrées pendant les années de forts débits turbinés. Ce qui confirme la relation presque parfaite ($r = 0.90$) entre les deux variables à Nangbéto contrairement à Kossou ($r = 0.29$) comme l'illustre la figure 6.

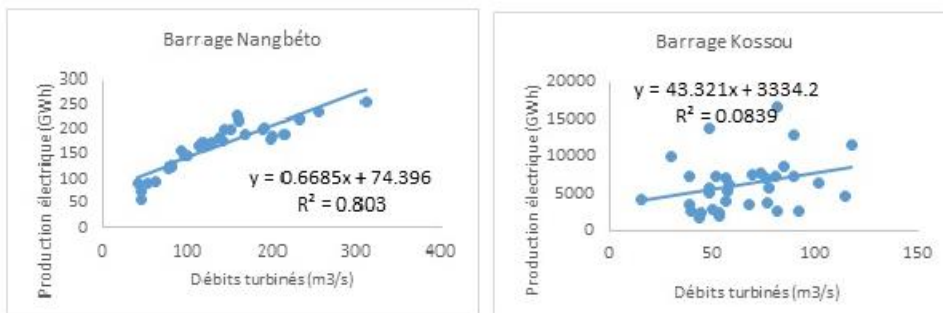


Figure 6. Relation production électrique/ débits turbinés dans les deux bassins-versants

Les résultats montrent également que le barrage de Kossou produit près de 33 fois en moyenne la production électrique de Nangbéto, confirmant la taille la plus petite du barrage. Cette forte production électrique de Kossou est liée à la capacité (1700 km²) et au nombre de turbines (3) contre 2 turbines à Nangbéto et une faible capacité de la retenue (180 km²) soit 9 fois plus petit.

Conclusion

Au terme de cette étude, il faut retenir une relation dégradée entre la pluie et le débit dans les deux bassins anthropisés. Ce qui se justifie par les lâchers d'eau des barrages qui soutiennent les débits d'étiages de plus de 82 % en moyenne. Par contre, les barrages régularisent les crues avec leur diminution plus marquée à Kossou (97 %) qu'à Nangbéto (47 %). Ainsi, il revient de constater qu'un bassin aménagé a un débit de fonctionnement dit "artificiel".

Les différences entre les débits entrant et sortant sont plus marquées à Kossou qu'à Nangbéto du fait de la capacité de stockage de ce dernier. Les lâchers d'eau dans les bassins-versants des deux barrages entraînent une augmentation du coefficient d'écoulement plus marqué à Nangbéto (30 %) qu'à Kossou (13 %) montrant le sous-dimensionnement de ce dernier.

Les faibles débits d'écoulement engendrent une faible production électrique dans les barrages à faible capacité de stockage comme Nangbéto contrairement au barrage de Kossou, qui a une grande capacité. Dans les barrages à faible capacité de stockage d'eau comme Nangbéto, on assiste à une forte relation entre les débits turbinés et la production électrique contrairement au barrage de grande capacité. Le barrage de Kossou 9 fois plus grand que celui de Nangbéto, produit 33 fois de l'énergie électrique que celui-ci.

Bibliographie

- Amoussou E., 2010. *Variabilité pluviométrique et dynamique hydro-sédimentaire du bassin versant du complexe fluvio-lagunaire Mono-Ahémé-Couffo (Afrique de l'ouest)*. Doctoral dissertation in geography, École doctorale E2S, Dijon. URL: <https://www.theses.fr/2010DIJOL001>
- Amoussou E., Camberlin P., & Mahé G., 2012. Impact de la variabilité climatique et du barrage Nangbéto sur l'hydrologie du système Mono-Couffo (Ouest Afrique). *Hydrological Sciences Journal*, 57 (4), 805–817.
- Anoh K. A., Koua T. J. J., Kouamé K. J., Jourda J.P., & Laurent F., 2017. Modelling water flow in a complex watershed in humid a tropical area using swat: a case study of Taabo watershed in Ivory Coast. *International Journal of River Basin Management*. Doi : 10.1080/15715124.2017.1387122.
- IPCC, 2007. *Climate Change 2007. The Physical Science Basis*. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Solomon, S., D. Qin, M. Manning, Z. Chen, M. Marquis, K.B. Averyt, M. Tignor and H.L. Miller (eds.). Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, 996p.
- Konan K. S., Kouassi K. L., Konan K. F., Kouame K. I., Aka K., & Gnakri D., 2013. Evaluation des charges solides et caractérisation hydrochimique des eaux du lac du barrage hydroélectrique d'Ayamé 1 (Côte d'Ivoire). *Bulletin de l'Institut Scientifique, Rabat*, (35), 17-25.
- Korkovelos A., Mentis D., Siyal S., Arderne C., Rogner H., Bazilian M., & De Roo A., 2018. A Geospatial Assessment of Small-Scale Hydropower Potential in Sub-Saharan Africa. *Energies*, 11(11), 3100. Doi : <https://doi.org/10.3390/en11113100>
- Kouame K.A., Kouame K.F., Kouassi A.M., Oulare S., Adon G.C., 2011. Mise en place d'une base de données pour une modélisation hydrologique distribuée du bassin versant du Bandama (Côte d'Ivoire) : Apport d'un modèle numérique d'altitude, de la télédétection et du SIG Physitel. *Afr. Sci.* 2011, 07, 94–114.
- Kouame Y., M., Obahoundje S., Diedhiou A., François B., Amoussou E., Anquetin S., Didi S., R., & Yao K.E., 2019. Climate, Land Use and Land Cover Changes in the Bandama Basin (Côte D'Ivoire, West Africa) and Incidences on Hydropower Production of the Kossou Dam. *Land*, 8 (103). Doi : 10.3390/land8070103.
- Mahé G. & Olivry J.C., 1995. Variations des précipitations et des écoulements en Afrique de l'Ouest et Centrale de 1951 à 1989. *Rev. Sécheresse* n° 6, 109-117.
- Singh V. P., & Woolhiser D. A., 2002. Mathematical modeling of watershed hydrology. *Journal of hydrologic engineering*, 7(4), 270-292.

MAPPING FOSSIL FUEL CO₂ EMISSIONS IN CURITIBA, BRAZIL: AN APPROACH BASED ON STREET SCALE

ANJOS M., MENDONÇA F., FORIGO Y.

Labolcima, Federal University of Paraná, Curitiba, Brazil (maxanhos@campus.ul.pt)

Summary: *Quantification of whole-city greenhouse gas emissions at fine spatiotemporal resolution is currently the most obvious and straightforward efforts in carbon cycle and climate change research. This work presents an approach for quantifying building and transportation FFCO₂ emissions at high spatial resolution in Curitiba, Brazil. The methodology tests an alternative approach to provide insights into the FFCO₂ emissions in urban areas, using indirect on-road emissions associated with energy consumption, GIS building and road data. A comprehensive FFCO₂ dataset with sampled and predicted values for whole city at fine spatial is presented. Our results can help to providing a detailed greenhouse gases inventories and climate change adaption plans, the two most important tools used by urban policy communities to address climate change.*

Key words: *climate change; carbon dioxide; global warming; carbon mapping; Curitiba*

Résumé : *Cartographie des émissions de CO₂ des combustibles fossiles à Curitiba au Brésil : une approche basée à l'échelle de la rue. La quantification des émissions de gaz à effet de serre à travers la ville, avec une résolution spatiale et temporelle fine (haute résolution), est actuellement l'effort le plus important dans la recherche sur le cycle du carbone au sein du changement climatique. Ce travail vise à quantifier les émissions de FFCO₂ des bâtiments et des transports à haute résolution spatiale à Curitiba. La méthodologie teste une approche alternative pour fournir un aperçu des émissions de FFCO₂ dans les zones urbaines, en utilisant les émissions indirectes des routes associées à la consommation d'énergie à partir des données SIG. Un ensemble complet de données sur le FFCO₂ avec des valeurs échantillonnées et prévues pour toute la ville est présentée à une échelle spatiale fine. Les résultats peuvent aider à fournir un inventaire détaillé des gaz à effet de serre et des plans d'adaptation au changement climatique, les deux outils les plus importants utilisés par les communautés de politiques urbaines pour lutter contre ce phénomène.*

Mots clés : *changement climatique ; dioxyde de carbone ; réchauffement climatique ; cartographie du carbone ; Curitiba*

Introduction

The rising fossil fuel carbon dioxide emissions (FFCO₂) is the most important forcing to anthropogenic climate change (IPCC, 2014). Cities are now major contributors to greenhouse gas emissions as consume 70% of their energy from coal, oil and natural gas (Cities 40) and this is projected to rise in the coming decades, as urbanization and economic growth trend intensify, especially in the developing countries.

Urban density, spatial organization, mobility and lifestyle are crucial elements that influence energy consumption, especially in transportation and building systems. Thus, the quantification of whole-city FFCO₂ emissions at fine spatiotemporal resolution is currently the most obvious and straightforward efforts in carbon cycle and climate change research (Wu *et al.* 2018; Yamagata *et al.* 2018; Gurney *et al.* 2019). The main source of FFCO₂ emissions is the greenhouse gases inventories that are typically tracked at the national, regional or city level with the focus at an annual timescale. This means that these inventories do not provide detailed information about FFCO₂ emissions in the city (e.g. those emission on a neighbourhood scale or major roadways), which are important to the urban policy communities to manage their low-carbon actions, in a suitable manner.

Carbon mapping emerges as an approach that traces all FFCO₂ emissions in urban areas. Carbon mapping is a new field of study and has focused on the estimates of FFCO₂ emissions at fine spatiotemporal scales. This technology of mapping provides multiple benefits to understanding climate change literacy as estimated CO₂ emissions are critical for many reasons, as reported by Gurney *et al.* (2015, Nature 525, 179): “to verify emissions rates; to confirm

progress towards reduction and support carbon trading, permits or taxation; to enable more-targeted and financially efficient decisions about mitigation option”.

Carbon mapping uses mainly the bottom-up and top-down approaches (e.g. Zhou and Gurney, 2010; Gately *et al.* 2013; Rao *et al.* 2017). The former quantifies the indirect FFCO₂ emissions from various sources, using minimum GIS data requirements (energy fuel consumption simulation and reporting, transportation data, building information, sociodemographic statistics). The latter measures *in situ* CO₂ fluxes by using sensors mounted at network stations or tall towers, which requires extensive human, financial and logistical resources. This partly why the *in situ* CO₂ concentration is underresearched in most cities worldwide. Thus, it is important to test alternative bottom-up approaches that can provide insights into the FFCO₂ emissions in urban areas.

This study is part of an ongoing research project, which aims at developing an approach for quantifying building and transportation FFCO₂ emissions at a high spatiotemporal resolution. Here, we presented the spatial and temporal distribution of the on-road CO₂ emissions in Curitiba city, Brazil.

1. Data and Methods

1.1. Study area

Curitiba is the largest city of the state of Paraná, localized in southern Brazil (lat. 25°25'S, long. 49°16'W, alt. 930 m). The population accounts to 1.9 million inhabitants, being 96% urban residents (IBGE, 2010). The city has a humid subtropical climate, Cfb according to the Köppen-Geiger classification, with a mean annual air temperature of 21°C and mean annual accumulated rainfall of 1,576 mm. It has hot and rainy summers (December to February) and cool and dry winters (June to August).

The city experienced rapid urbanisation leading to substantial changes in the land use and increase in the built-up area. Local governmental recognizes that the greenhouse gas emissions from human activity have influences in climate and weather changes in Curitiba. Currently, Curitiba is part of the Urban Low Emission Development Strategies – Urban Leds international project that helps the city to drive its greenhouse gases inventories.

1.2. Calculation of CO₂ emissions from road

The bottom-up approach was used as method to quantify on-road CO₂ emissions (Zhou and Gurney, 2010; Yamagata *et al.* (2018). This approach considers the traffic volumes by the vehicle types, distribution of vehicle kilometers traveled associated, specific emission factor and road configuration. The estimate of CO₂ emissions (E) at each road was calculated by the following equation:

$$E = TV \times RL \times EF, \quad (1)$$

were TV is the traffic volume that includes the vehicle type (bus, trucks, passenger vehicle, motorcycle), RL is the road link or road segment, and EF is the emission factor. The length (unit km) of a road link was calculated using the ArcMap/ARCGIS software. We assume that the traffic flow density and, consequently, the resulting CO₂ emissions are equal throughout one road link. For each vehicle type we used the emission factor by kilometre travelled an individual road link associated with consumption of fuel (Tab.1).

We used traffic count data at 201 intersections of road in the period of January 2019 provided by the Municipal Secretariat of Social Defense and Traffic, Curitiba. Road data with geographic location information was derived from the Geofabrik (<https://download.geofabrik.de>) that provides the open geodata from OSM project for whole planet in a vector format. Then, we extracted the OSM highway shapefile to Curitiba boundaries and classified the road as motorway, trunk, primary, secondary, tertiary and residential.

To map the whole-city on-road CO₂ emission, we use the mean TV of the sampled individual road link according to the OSM-road class and attributed this mean of TV to the non-sampled road link with same class, applying the equation 1. Subsequently, the sampled and predicted CO₂ emission values (tonnes of CO₂ equivalent) at each road were mapped for the total month, weekdays, weekend, and diurnal cycle timescales.

The uniform spatial distribution of the CO₂ emissions was rescaled to building and road footprint area resolution, using the Geographic Information System (GIS) toolbox ESRI®ARCGISTM10.6.

Table 1. Description of vehicle and fuel by type, and EF used in this study

| <i>Vehicle type</i> | <i>Fuel used</i> | <i>Emission factor of CO₂ kg/km</i> □□ | <i>References</i> |
|--------------------------|------------------|--|-------------------|
| <i>Motorcycle</i> | Gasoline | 0.129 | IBMA (2013) |
| <i>Passenger vehicle</i> | Gasoline | 0.198 | IBMA (2013) |
| <i>Bus</i> | Diesel | 0.521 | EPE (2007) |
| <i>Truck</i> | Diesel | 0.789 | IPCC – 2006 |

2. Results

Curitiba roads have a different estimates of CO₂ emissions with a range from 0.3 to 3.730 tonnes of CO₂eq (Fig.1). A total of 996 roads were modelled and they together produced an amount of 7.600 tonnes of CO₂eq in January 2019. The spatial distribution revealed that the roads classified as motorway and primary are most responsible for CO₂ emission compared to tertiary and residential classes.

As a means of exploring details of the effect of the traffic activities on the CO₂ emission at a high temporal resolution, we showed the diurnal cycle and weekdays and weekend of the total CO₂ emissions in a road for the month January 2019. The CO₂ emissions increase sharply at 06:00, due to intensity vehicle fluxes on-roads and reach a maximum of 27 tonnes of CO₂eq at 18:00 (Fig.2). The CO₂ emissions start to decrease at 19:00 and the small emission was low (5 tonnes of CO₂eq) until 05:00. The high emissions ranged from 465 to 508 tonnes of CO₂eq during weekdays, whilst during the weekend days ranged 214 to 333 tonnes of CO₂eq, when the traffic volume is reduced (Fig.3).

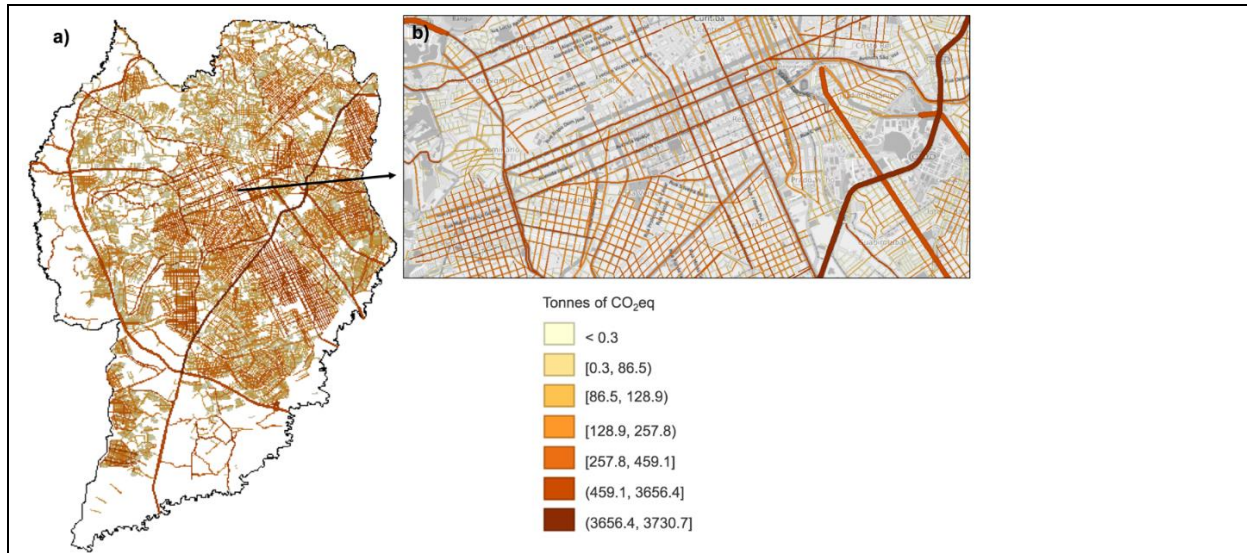


Figure 1. Total fossil fuel CO₂ emissions on road for Curitiba for the month January 2019: (a) all roads are displayed and (b) roads from the centre of the city. Units: tCO₂eq/month.

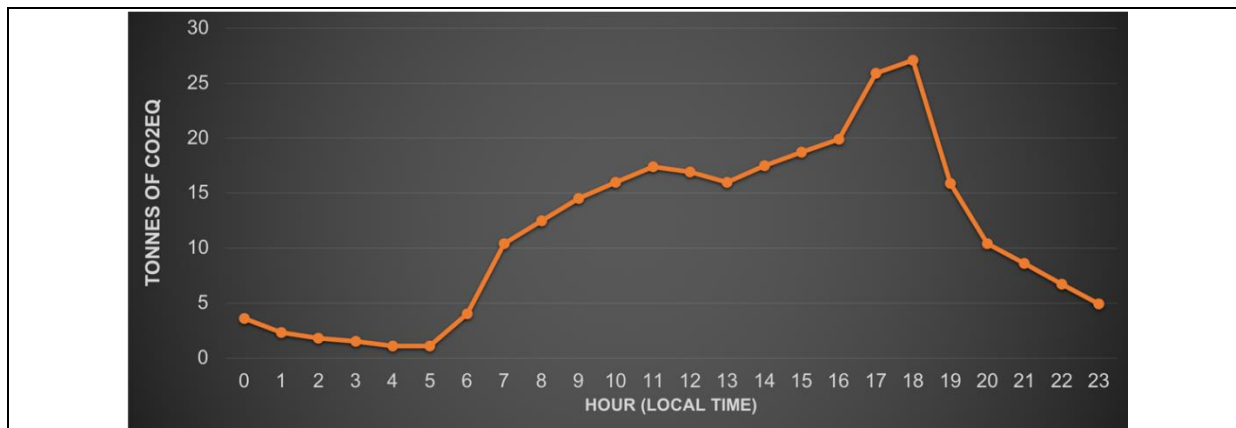


Figure 2. Diurnal cycle of the fossil fuel CO₂ emissions on a road for Curitiba for the month January 2019. The 24 de Maio street is used as reference.

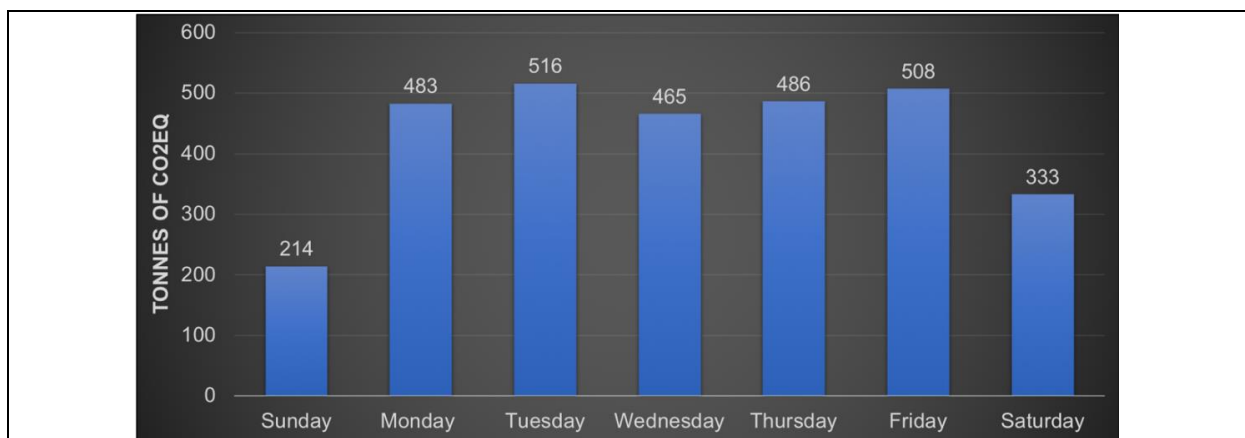


Figure 3. Weekdays and weekend temporal of the fossil fuel CO₂ emissions on a road for Curitiba for the month January 2019. The 24 de Maio street is used as reference.

Conclusions and Discussion

This study expands the Curitiba GHG inventory analysis, quantifying the FFCO₂ emissions from roads at a high-resolution spatial scale. The spatial distribution of the FFCO₂ emissions showed that all Curitiba roads emitted 7.600 metric tones of FFCO₂eq/month, with a significant difference levels to major roads. This agrees with several researches that have reported the major roads with high traffic flux and the proximity to the industrial centers are home the worst levels of short-lived pollutants in Curitiba (Poelezer *et al.* 2018; Castelhana, 2019).

Although many cities have one of the most ambitious Paris Agreement targets to reduce greenhouse-gas emissions, there is a need for an international greenhouse gas standard that provides consistency in the calculation and reporting of greenhouse gas emissions attributable to cities. For Brazilian cities, there is no national legislation that regulates the CO₂ emissions from vehicle mobile, that difficult the comparison between cities. With quantification of building CO₂ emissions at high-resolution, it is possible to create new indicators of long-lived pollutants and detailed inventories applied to cities.

The study presented here is now part of a global urban carbon mapping model, in which the CO₂ emissions building sector and emissions sociodemographic patterns for different Local Climate Zones classes are being developed. Standardizing the CO₂ mapping for different generical and universal LCZ classes, we can predict the estimates of emission to another area of the city identified as same LCZ class, so that model can be applied to any city in the world.

Acknowledgements

Max Anjos held a post-doctoral fellowship from PRINT/CAPES (Brazilian Ministry of Education). The authors would like to thank the Municipal Secretariat of Social Defense and Traffic, Curitiba for furnishing traffic data and researches of the Laboclima at the Federal University of Paraná, Brazil, for critical comments.

Literature

Castelhana F. J., 2019. *Qualidade do ar no AUC (Agglomerado Urbano de Curitiba/PR) :configuração atual e perspectivas no âmbito das mudanças climáticas globais*. PhD Thesis in Geography, Federal University of Paraná, Curitiba, Brésil.

EPE., 2007. Empresa de Pesquisa Energética, Ministério de Minas e Energia – MME. [en ligne]. URL: [http://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-250/topico-304/EPE%20-%202020%20Biocombust%C3%ADveis%20x%20MDL\[1\].pdf](http://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-250/topico-304/EPE%20-%202020%20Biocombust%C3%ADveis%20x%20MDL[1].pdf) (accessed in 18 December 2019).

Gately C. K. *et al.*, 2013. A bottom up approach to on-road CO₂ emissions estimates: Improved spatial accuracy and applications for regional planning. *Environmental Science and Technology*, 47 (5), 2423–2430.

Gurney K.R. *et al.*, 2019. The Hestia fossil fuel CO₂ emissions data product for the Los Angeles megacity (Hestia-LA). *Earth System Science Data*, 11(3), 1309–1335.

Gurney K.R., *et al.*, 2015. Climate change: Track urban emissions on a human scale. *Nature* (525), 179–181.

IBMA., 2013. Brazilian Institute of Environment and Renewable Natural Resources. 1^o Inventário Nacional de Emissões Atmosféricas por Veículos Rodoviários, 2013. [en ligne]. URL: https://www.mma.gov.br/images/arquivo/80060/Inventario_de_Emissoes_por_Veiculos_Rodoviarios_2013.pdf (accessed in 10 December 2019).

IPCC., 2006. Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories, Direc- trices para los inventarios nacionales GEI, p.12. [en ligne]. URL: <http://www.ipcc-nggip.iges.or.jp/public/2006gl/index.html> (accessed in 20 December 2019).

IPCC., 2013. Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change, edited by: Stocker T. F., Qin D., Plattner

G.-K., Tignor M., Allen S. K., Boschung J., Nauels A., Xia Y., Bex V., & Midgley P. M., Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY.

N.B., Ehleringer, *et al.*, 2015. Climate change: Track urban emissions on a human scale. *Nature* (525), 179–181.

Polezer G., Tadano Y.S., Siqueira H. V., Godoi A.F.L., Yamamoto C.I., de Andr. P.A., Pauliquevis T., Andrade M. de F., Oliveira A., Saldiva P.H.N., Taylor P.E., Godoi R.H.M., 2018. Assessing the impact of PM 2.5 on respiratory disease using artificial neural networks. *Environmental Pollution* (235), 394–403.

Rao P., Gurney K. R., Patarasuk R., Yang S., Miller C. E., Duren R. M., & Eldering A., 2017. Spatio-temporal variations in on-road CO₂ emissions in the Los Angeles Megacity. *AIMS Geosciences*. (3), 239–267.

Stewart I.D., Oke T.R., 2012. Local Climate Zones for Urban Temperature Studies. *Bulletin American Meteorological Society*. (93), 1879–1900.

Yamagata Y., Yoshida T., Murakami D., Matsui T., Akiyama Y., 2018. Seasonal urban carbon emission estimation using spatial micro Big Data. *Sustainability*. (10), 1–11.

Zhou Y., Gurney K., 2010. A new methodology for quantifying on-site residential and commercial fossil fuel CO₂ emissions at the building spatial scale and hourly time scale. *Carbon Management*. (1), 45–56.

CHANGEMENT CLIMATIQUE ET TERRITOIRES

Actes du colloque organisé à Rennes
du mercredi 1^{er} au samedi 4 juillet 2020
(annulé pour raison sanitaire Covid-19)

COMPOSITION DU COMITE D'ORGANISATION

Vincent DUBREUIL
Université Rennes 2, UMR 6554 LETG

Jean NABUCET
CNRS UMR 6554 LETG

Sébastien BRUNEAU
Responsable administratif, Université Rennes 2

Roselyne BILLY
Gestion administrative, Université Rennes 2, UMR 6554 LETG

Claudie PERON
Gestion administrative, CNRS, UMR 6554 LETG

Clémentine CHARMONT
Gestion éditoriale, Université Rennes 2

Franck BARAER
Météo-France, Direction Interrégionale Ouest

Emmanuel Bouriau
AUDIAR

Xavier FOISSARD
TerraClima

Alain Hervé LE GALL
multiCOM, OSUR, Université Rennes 1 / CNRS

Igor SNIRIK
Post-doctorant associé LETG-Rennes

Fanny GAUTIER
Doctorante, UMR 6554 LETG-Rennes

Gwenael MORIN
Doctorante, UMR 6554 LETG-Rennes

Pedro MUTTI
Doctorant, UMR 6554 LETG-Rennes

Jeanne THIBAUT
Doctorante, UMR 6554 LETG-Brest

EDITEURS SCIENTIFIQUES

Valérie BONNARDOT & Hervé QUENOL
Université Rennes 2, LETG-Rennes UMR 6554 CNRS

En partenariat avec :



Réalisation et mise en page des Actes :

Clémentine CHARMONT

Les opinions défendues dans cet ouvrage n'engagent que les auteurs ; elles ne sauraient être imputées aux institutions auxquelles ils appartiennent ou qui ont financé leurs travaux.

© LETG, 2020

ISBN 978-2-907696-26-5