



Original Paper

<http://ajol.info/index.php/ijbcs>

<http://indexmedicus.afro.who.int>

Flux des gaz à effet de serre (CH₄ et N₂O) dans le fleuve Niger en amont de Niamey (Niger)

Bassirou ALHOU^{1*} et Issiaka BOUKARI²

¹ Département de Sciences de la Vie et de la Terre, Ecole Normale Supérieure, Université Abdou Moumouni, Niger.

² Département de Chimie, Ecole Normale Supérieure, Université Abdou Moumouni, Niger.

*Auteur correspondant ; E-mail: alhoubass@yahoo.fr

RESUME

Les écosystèmes aquatiques constituent une source importante d'émission des gaz à effet de serre très souvent négligés dans l'établissement des bilans globaux dont les principaux gaz sont le CO₂, le CH₄ et le N₂O. L'objectif de cette étude est de déterminer l'origine des flux des deux derniers gaz et la capacité d'assimilation de leur flux par le fleuve Niger à Niamey. D'avril 2011 à mars 2013, des prélèvements ont été effectués toutes les deux semaines afin de mesurer les concentrations du CH₄ et de N₂O dissous dans les eaux du fleuve Niger en amont de Niamey à Tondibia par chromatographie en phase gazeuse. Des paramètres physicochimiques (Température, pH, Conductivité et oxygène dissous) ont été mesurés *in situ* avec une sonde multi-paramètres HI 9828 HANNA et l'alcalinité par titration, avec de l'acide chlorhydrique 0.1 M. Les concentrations en CH₄ (42 à 331 nM) et N₂O (6 à 13 nM) ont permis d'obtenir des émissions respectives de 470 μmol/m²/jour et 3,59 μmol/m²/jour. Ces résultats montrent que le fleuve Niger constitue une source potentielle de flux de ces gaz vers l'atmosphère. Ces flux proviennent de la dégradation des matières organiques issues du milieu terrestre dans le fleuve Niger.

© 2016 International Formulae Group. All rights reserved.

Mots clés : Fleuve Niger, Niamey, flux, gaz à effet de serre, méthane, protoxide d'azote.

Flow of greenhouse gases (CH₄ and N₂O) in the River Niger upstream from Niamey (Niger)

ABSTRACT

Aquatic ecosystems constitute an important source of greenhouse gases, including CO₂, CH₄ and N₂O, emission that is often neglected globally. This study aimed at determining the source of the flux of CH₄ and N₂O and the assimilation capacity of this by River Niger in Niamey area. From April 2011 to March 2013, samples were taken every two weeks to measure the concentrations of methane (CH₄) and nitrogen protoxide (N₂O) dissolved in the River Niger waters in Tondibia, a small town upstream Niamey city. These concentrations were determined by gas chromatography. Additional measures of physicochemical parameters (temperature, pH, conductivity, dissolved oxygen and alkalinity) were performed. Temperature, conductivity, dissolved oxygen and pH were measured *in situ* using HANNA HI 9828 Multiparameter. The alkalinity is determined by titration, with 0.1 M hydrochloric acid. Results showed that the River Niger constituted a

potential source of the flux of these gases toward the atmosphere. These fluxes represented $470 \mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{day}$ for the protoxide of nitrogen and $3.59 \mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{day}$ for methane. They emanated from the degradation of organic matter inputs into the River from the terrestrial environment.

© 2016 International Formulae Group. All rights reserved.

Keywords : River Niger, Niamey, flux, greenhouse gaz, methane, protoxide of nitrogen.

INTRODUCTION

Les principaux gaz à effet de serre sont: le dioxyde de carbone (CO_2), le méthane (CH_4) dont le potentiel de réchauffement global est de 62 fois celui du CO_2 , le protoxyde d'azote ou hémioxyde d'azote (N_2O) avec un potentiel de réchauffement global de 275 fois celui du CO_2 et les gaz fluorés (CFC-11, CFC-12, HCFC-22 et CF_4), leur potentiel de réchauffement global va de 3900 fois à 10200 fois celui du CO_2 (Seguin et Soussana, 2008).

Le CH_4 et le N_2O , deux des trois principaux gaz à effet de serre influencent directement ou indirectement le climat à l'échelle planétaire (Bange, 2006) hypothéquant l'équilibre écologique de la planète (Chaibou et al., 2016). Les écosystèmes aquatiques bien qu'ils représentent de faibles superficies, par rapport aux écosystèmes terrestres, constituent une source importante d'émission de ces gaz. Bien que ces gaz existent, pour la plupart à l'état naturel, leur concentration dans l'atmosphère est amplifiée par les déchets issus des activités anthropiques (NIKIEMA et al., 2015). Mais, les émissions de ces gaz issus des milieux aquatiques sont très rarement quantifiées surtout en Afrique (Borges et al., 2015). C'est le cas du Niger qui malgré son fleuve qui draine une superficie d'environ 2120000 km^2 (ABN, 2002 ; IRD et UNESCO, 2012), les données sur les GES relatives à ce troisième grand fleuve d'Afrique après le Nil et le Congo, sont quasi inexistantes. Ceci constitue un vide scientifique et une information en moins dans l'établissement du bilan en GES au Niger. Au vu de l'intérêt que présentent les

flux des GES des milieux aquatiques dans le bilan global, cette étude se propose d'évaluer ces flux à l'échelle du fleuve Niger en amont de Niamey [$2,01^\circ \text{ E}$, $13,57^\circ \text{ N}$]. Elle s'est intéressée aux concentrations de deux gaz à effet de serre (GES) que sont le méthane (CH_4) et l'hémioxyde d'azote (N_2O) pendant une période de suivi allant d'avril 2011 à mars 2013.

MATERIEL ET METHODES

Présentation de la zone d'étude

Les échantillons d'eau ont été prélevés sur le fleuve Niger en amont de la ville de Niamey à Tondibia (Figure 1) sous un climat aride caractérisé par une pluviométrie moyenne de $517,90 \text{ mm}$, une température de $29,8^\circ \text{ C}$ et une évapotranspiration totale annuelle de $2\ 802,5 \text{ mm}$. Le site d'échantillonnage (Tondibia) se trouve à 185 m d'altitude entre $13^\circ 33' 44'' 26$ de latitude et $2^\circ 00' 33'' 39$ de longitude. Ce site est choisi pour éviter les apports liés à la pollution urbaine qui est une source importante de production de gaz à effet de serre (Adjiri et al., 2008 ; Traoré et al., 2016).

Prélèvement des échantillons et Techniques d'analyse

Le suivi a été effectué sur le fleuve Niger en amont de la ville de Niamey d'avril 2011 à mars 2013 en raison d'un prélèvement toutes les deux semaines. Soit un total de 50 échantillons prélevés. La température, la conductivité, l'oxygène dissous et le pH sont mesurés *in situ* à l'aide d'une sonde multiparamètres de marque HANNA. L'alcalinité a été déterminée par titration à l'aide de l'acide

chlorhydrique 0,1 M de l'ensemble des bases présentes dans l'eau (HCO_3^- ; CO_3^{2-} ; OH^- ; H_3O^+). Les mesures ont été effectuées sur des échantillons d'eau filtrés à l'aide des filtres encapsulés de 0,22 μm montés sur une seringue (Rodier et al., 2016).

Des échantillons pour CH_4 et N_2O ont été recueillis directement à partir de la bouteille de Van Dorn dans des fioles de 40 ml contaminées au Lugol ou au HgCl_2 , et fermées avec un bouchon en caoutchouc recouvert de papier aluminium. Des concentrations de CH_4 et du N_2O ont été déterminées par chromatographie en phase gazeuse, après création d'un espace de tête par ajout de 25 ml d'azote gazeux (N_2). Après une nuit de conservation à température contrôlée et constante, 10 ml de gaz ont été prélevés dans l'espace de tête et injectés dans le chromatographe en phase gazeuse qui utilise le N_2 comme gaz porteur (Abril et Iversen, 2002).

Traitement des données

Les données ont été traitées dans le tableur Excel et à l'aide du logiciel StatView version 5.0.1. Les tests statistiques utilisés sont les analyses de corrélation et de variance au seuil de 5%.

RESULTATS

Les paramètres physico-chimiques (Débits, température, pH, oxygène dissous, conductivité électrique et alcalinité totale) sont représentés dans le Tableau 1.

Hydrologie du fleuve Niger

Le débit des eaux du fleuve Niger à Tondibia (Niamey) varie de 75 à 1963 $\text{m}^3 \text{s}^{-1}$ avec une moyenne de $885 \pm 618 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$. La moyenne en première année de suivi est de $674 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ contre $1\,096 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ indiquant ainsi une forte variabilité interannuelle. Il faut noter que le fleuve Niger à Niamey présente deux crues. Une première petite crue engendrée par les eaux de ruissellement en saison des pluies

qui va de juin à août. Cette crue est caractérisée par des eaux assez chargées présentant un aspect trouble. Et, une grande crue appelée aussi crue guinéenne car occasionnée par des eaux claires venant de la source. Ces deux crues confèrent au fleuve Niger une hydrologie particulière assez déterminante pour son fonctionnement.

Paramètres généraux

Il s'agit de la température, du pH, de l'oxygène dissous et de la conductivité.

Température

Elle varie de 18,51 à 31,10 °C. La moyenne est de $26,55 \pm 3,68$ °C. La température connaît une variation saisonnière significative ($p < 0,05$) aux mois de décembre, janvier et février qui sont les mois les plus frais de l'année.

pH

Il est neutre à légèrement basique. Les valeurs enregistrées varient de 7,05 à 8,01 avec une moyenne de $7,49 \pm 0,26$. La variabilité du pH des eaux du fleuve Niger à Tondibia est assez faible. Mais, quelques différences significatives ($p < 0,05$) s'observent surtout aux mois d'août, avril et décembre.

Oxygène dissous

La concentration en oxygène dissous varie de 70,90 à 103,50%. La moyenne est de $91,92 \pm 6,55\%$ avec une variabilité faible dans l'ensemble. Cependant, on note une différence significative ($p < 0,05$) entre les périodes correspondant aux crues locale et guinéenne et la période des basses eaux.

Conductivité électrique

Elle varie de 35 à 102 $\mu\text{S cm}^{-1}$. La moyenne est de $53,42 \pm 14,02 \mu\text{S cm}^{-1}$; elle reflète une faible minéralisation des eaux du fleuve Niger à Tondibia. Elle varie significativement ($p < 0,05$) en fonction du

régime hydrologique du fleuve (crue locale, basse eaux et crue guinéenne).

Alcalinité totale

L'alcalinité totale des eaux du fleuve Niger à Niamey varie de 0,38 à 0,90 mmol/kg avec une moyenne de $0,56 \pm 0,13$ mmol/kg sur les deux ans de suivi. Elle varie de manière significative ($p < 0,05$) à très significative ($p < 0,01$) entre la période allant d'avril à juin caractérisés par des concentrations les plus élevées et la période allant de septembre à novembre, qui présentent des concentrations les plus faibles.

Méthane

Les concentrations en méthane connaissent des fluctuations importantes au cours du cycle hydrologique plus particulièrement en saison des pluies. Elles

varient de 42 à 331 nM avec une moyenne globale de 149 nM (Figure 2). Le maximum de concentration est obtenu en septembre en première année (241 nM) et en août la deuxième année (331 nM).

Protoxyde d'azote

Les taux en N_2O dans le fleuve Niger à Niamey varient entre 93 et 223% sur les deux années de suivi (Figure 3). Ils présentent globalement une sursaturation en N_2O en dehors du mois de décembre à janvier de la deuxième année. Le taux maximum est obtenu en août juste avant la crue locale (164,1% en première année et 223,21% en seconde année).

Quant au taux en isotopes stables de l'azote particulaire ($\delta^{15}N$ -PN) du fleuve Niger à Niamey, il varie entre 0,1‰ et 7,3‰ (Figure 4).

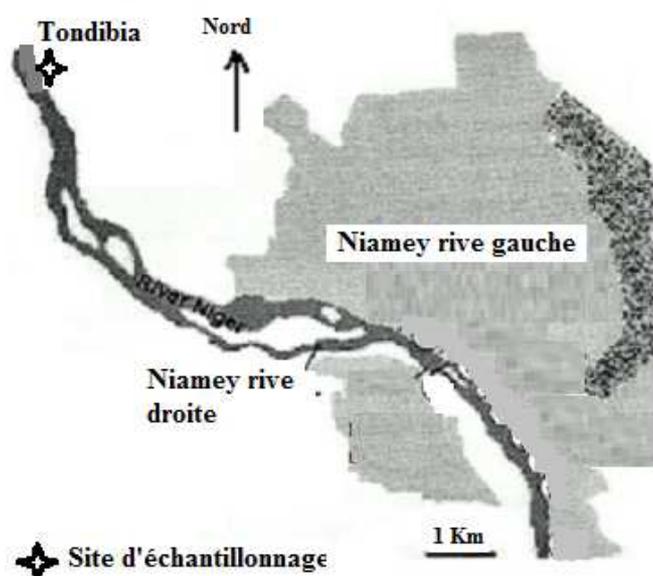


Figure 1 : localisation du site d'échantillonnage.

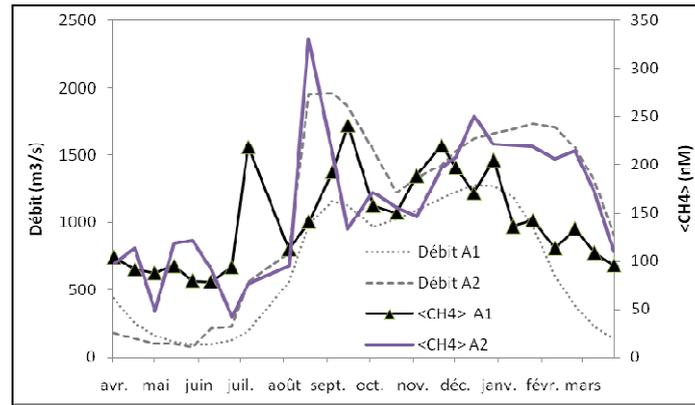


Figure 2 : Variation des concentrations en CH₄ du fleuve Niger à Niamey d'avril 2011 à mars 2013. (A1 = année 1 ; A2 = année 2).

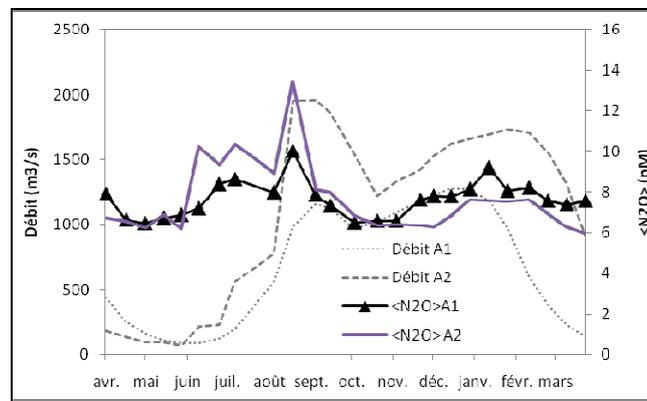


Figure 3 : Variation du %N₂O du fleuve Niger à Niamey d'avril 2011 à mars 2013. (A1 = année 1 ; A2 = année 2).

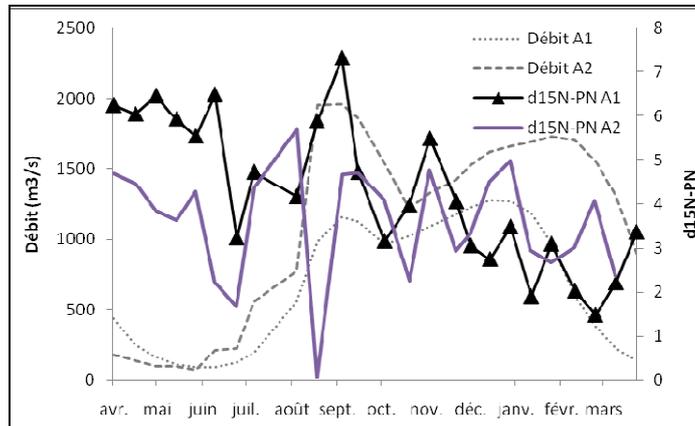


Figure 4 : Variation des taux en δ¹⁵N-PN du fleuve Niger à Niamey d'avril 2011 à mars 2013. (A1 = année 1 ; A2 = année 2 ; PN = azote particulaire).

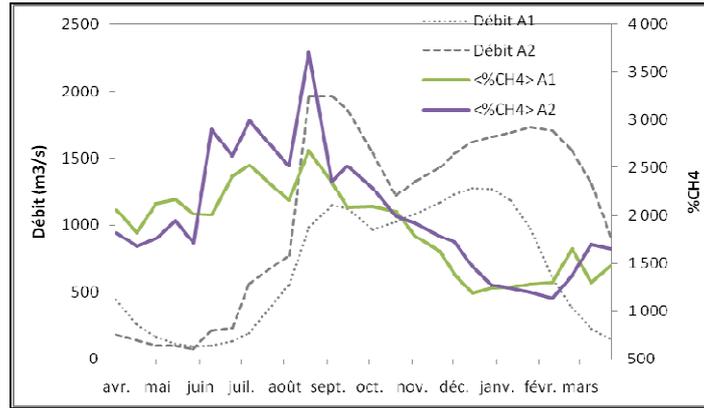


Figure 5 : Pourcentage de saturation du CH₄. (A1 = année 1 ; A2 = année 2).

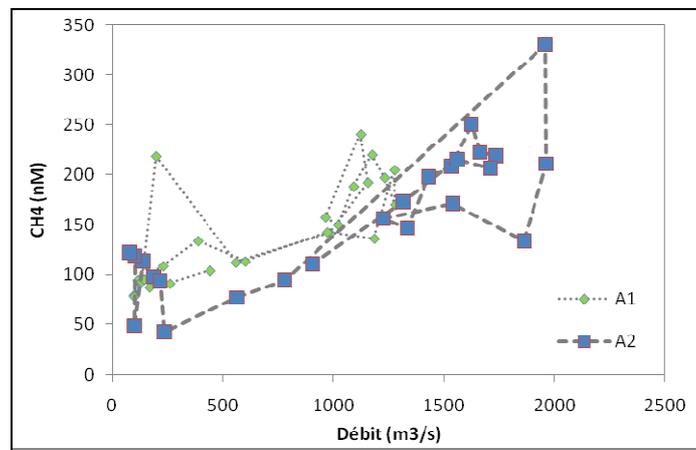


Figure 6 : Interrelation entre [CH₄] et débits. (A1 = année 1 ; A2 = année 2).

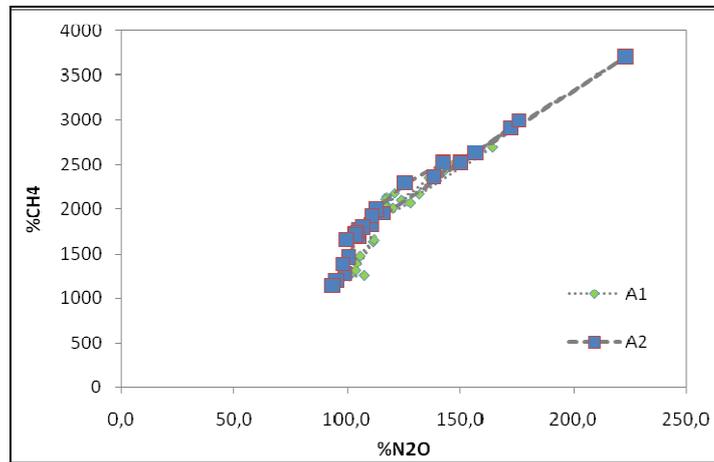


Figure 7 : Interrelation %CH₄ et %N₂O. (A1 = année 1 ; A2 = année 2).

Tableau 1 : Paramètres physico-chimiques suivis d'avril 2011 à mars 2013.

n = 50	Débits (m ³ s ⁻¹)	Température (°C)	pH	Oxygène Dissous (%)	Conductivité Electrique (µS cm ⁻¹)	Alcalinité totale (mmol/kg)
Moyenne	885	26,55	7,49	91,92	53,42	0,51
Ecart type	618	3,68	0,26	6,55	14,02	0,13
Minimum	75	18,51	7,05	70,90	35,00	0,39
Maximum	1963	31,10	8,01	103,50	102,00	0,61

n = nombre d'échantillons

DISCUSSION

Le fleuve Niger à Niamey présente une hydrologie particulière avec deux crues dont l'une est locale et déterminée par la saison des pluies et l'autre dite guinéenne provoquée par des eaux venant de la source. Cette hydrologie influe significativement sur certaines caractéristiques physico-chimiques du fleuve notamment le pH, la conductivité, l'oxygène dissous et l'alcalinité totale. Quant à la température, elle subit surtout une variation saisonnière.

Les concentrations en CH₄ dans le fleuve Niger sont très variables au fil du temps ; c'est la tendance générale observée dans la plus part des cours d'eau (Upstill-Goddard et al., 2000; Jayakumar et al., 2001; Middelburg et al., 2002). Pour le cas du fleuve Niger, on note une variation mensuelle significative ($p < 0,05$) entre les périodes correspondant aux crues locale et guinéenne caractérisées par des concentrations moyennes en CH₄ plus élevées (janvier, février, août, septembre, octobre, novembre et décembre) et la période des basses eaux qui présente des moyennes relativement plus faibles (mars, avril, mai, juin et juillet). Contrairement à certaines rivières, les concentrations les plus faibles sont obtenues en étiage (Abril et al., 2007). Elles sont toujours très sursaturées (Figure 5) comme dans plusieurs fleuves et rivières des régions tempérées et tropicales (Middelburg et al., 2002; Abril et al., 2005 ; 2007; Guérin et al., 2006 ; Bouillon et al., 2009). Le pourcentage de saturation

pour le fleuve Niger à Niamey varie entre 1133 et 3702% ; ces taux restent dans la gamme de variation des rivières tempérées et tropicales qui se situe entre 260 et 128420% (Upstill-Goddard et al., 2000 ; Middelburg et al., 2002). Néanmoins, leur gamme de variation est beaucoup plus importante que celle obtenue en Côte d'Ivoire (2221 à 38719%) sur les rivières de Comoé, Bia et Tanoé par Koné et al. (2010). Cette sursaturation en CH₄ entraîne une émission de ce gaz vers l'atmosphère avec un flux moyen annuel de 470 µmol/m²/jour. Contrairement à l'Oubangui, la Comoé, le Bia et le Tanoé (Bouillon et al., 2012 ; Koné et al., 2010), les concentrations en CH₄ dans le fleuve Niger montrent une corrélation positive avec le débit (Figure 6). En effet, lors des deux crues, le fleuve draine des eaux riches en CH₄ qui sont soit des eaux interstitielles de la rivière ou des sols, soit des eaux de bras morts.

En effet, la relation entre les concentrations en CH₄ dans le fleuve et les taux en oxygène dissous est globalement très faible ; ce qui exclut les conditions de production biologique du CH₄ dans la colonne d'eau du fleuve Niger (taux de saturation en oxygène dissous supérieurs à 70%).

Malgré, le rôle important du CH₄ dans la régulation de la nitrification et la production du N₂O dans le cycle global de l'azote en milieu naturel, les concentrations en CH₄ dans le fleuve Niger ne présentent pas d'interrelation significative avec le N₂O contrairement à Rajkumar et al. (2008), qui

mettent en évidence une interrelation négative entre CH_4 et N_2O . D'ailleurs, les concentrations en CH_4 obtenues sont assez faibles pour influencer le processus de nitrification dans le fleuve (1000 nM requis pour inhiber la nitrification (Ren et al., 2000).

On note une augmentation du taux en N_2O au moment de la montée de la crue locale et une relative stabilité sur le reste du temps. En effet, les moyennes de concentration en N_2O sont beaucoup plus importantes et significativement différentes ($p < 0,05$) aux mois d'août et juin qui sont les plus pluvieux de l'année. Cette différence soutend l'hypothèse selon laquelle le N_2O proviendrait du milieu environnant suite à un processus de dégradation de la matière organique au sein du fleuve Niger. Par ailleurs, la signature isotopique du $\delta^{15}\text{N}$ -PN montre bien que l'azote contenu dans les eaux du fleuve Niger en amont de Niamey ne provient ni d'une fixation biologique atmosphérique ni d'un apport par les eaux usées (Widory et al., 2005) mais probablement de la dégradation des apports de matières organiques provenant du milieu terrestre à partir du bassin versant ou dans le fleuve à partir des eaux interstitielles. Il faut également noter que la montée de la crue locale correspond à un moment où l'émission de N_2O par le sol est importante (Predotova et al., 2010) ; ce qui constitue une source potentielle pour le fleuve à travers les eaux de ruissellement.

Par ailleurs, contrairement à ce qui s'observe à l'Oubangui (Bouillon et al., 2012), le $\%\text{N}_2\text{O}$ est de manière très significative positivement corrélé au $\%\text{CH}_4$ ($R=0,946$; $P<0,01$: Figure 7) indiquant ainsi que le N_2O est produit dans les mêmes conditions anoxiques que le CH_4 . On note que le pourcentage de saturation en N_2O est en moyenne de 120,2%. Ce qui entraîne son émission vers l'atmosphère avec un flux moyen de $3,59 \mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{jour}$.

Conclusion

Le fleuve Niger à Tondibia (Niamey) est sursaturé en méthane et protoxide d'azote occasionnant ainsi des flux respectifs de 470 et $3,59 \mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{jour}$. La source potentielle de ces flux constitue la dégradation des apports en matières organiques dans le fleuve Niger provenant de son bassin versant.

CONTRIBUTIONS DES AUTEURS

AB a contribué à la collecte des échantillons, analyse des données et rédaction de l'article. BI a aussi contribué à la collecte des échantillons, analyse des données et rédaction de l'article.

REMERCIEMENTS

Au terme de cette étude, nous présentons nos remerciements : au projet AFRIVAL pour son appui financier dans la collecte des données et l'analyse des échantillons ; à l'autorité du bassin du Niger pour les données sur les débits du fleuve Niger à Niamey ; à la société d'exploitation des eaux du Niger pour les données sur le pH des eaux du fleuve ; au Docteur Ibro CHEKARAOU, Enseignant-Chercheur à l'Ecole Normale Supérieure, pour le résumé en anglais.

REFERENCES

- Abril G, Commarieu MV, Guérin F. 2007. Enhanced methane oxidation in an estuarine turbidity maximum. *Limnol. Oceanogr.*, **52**(1): 470–475.
- Abril G, Guérin F, Richard S, Delmas R, Galy-Lacaux C, Gosse P, Tremblay A, Varfalvy L, dos Santos MA, Matvienko B. 2005. Carbon dioxide and methane emissions and the carbon budget of a 10-year old tropical reservoir (Petit Saut, French Guiana). *Glob. Biogeochem. Cy.*, **19**(4).
- Abril G, Iversen N. 2002. Methane dynamics in a shallow non-tidal estuary (Randers Fjord, Denmark). *Mar. Ecol-Prog. Ser.*, **230**: 171-181.

- Adjiri OA, Gone DL, Kouame IK, Kamagate B, Biemi J. 2008. Caractérisation de la pollution chimique et microbiologique de l'environnement de la décharge d'Akouédo, Abidjan-Côte d'Ivoire. *Int. J. Biol. Chem. Sci.*, **2**(4): 401-410.
- Autorité du Bassin du NIGER (ABN). 2002. Programme pluriannuel de développement de l'Autorité du Bassin du NIGER, p63.
- Bouillon S, Abril G, Borges AV, Dehairs F, Govers G, Hughes HJ, Merckx R, Meysman, FJR, Nyunja J, Osburn C, Middelburg JJ. 2009. Distribution, origin and cycling of carbon in the Tana River (Kenya): a dry season basin-scale survey from headwaters to the delta. *Biogeosciences*, **6**: 2475-2493.
- Bouillon S, Yambélé A, Spencer RGM, Gillikin DP, Hernes PJ, Six J, Merckx R, Borges AV. 2012. Organic matter sources, fluxes and greenhouse gas exchange in the Oubangui River (Congo River basin). *Biogeosciences*, **9**: 2045–2062.
- Chaibou I, Illo Souley MH, Banoin M, Akpo L-E. 2016. Criblage et caractéristiques de germination des semences de *Jatropha curcas* L. (Euphorbiacée) en milieu expérimental au Niger. *Int. J. Biol. Chem. Sci.*, **10**(2): 749-759.
- Guérin F, Reynouard C, Abril G, Seyler P, Richard S, Burban RDB. 2006. Methane and carbon dioxide emissions from tropical reservoirs: Significance of downstream rivers. *Geophys. Res. Lett.*, **33**(21): L21407.
- IRD, UNESCO. 2012. Le fleuve Niger, de La forêt tropicale guinéenne au désert saharien : les grands traits des régimes hydrologiques, p27.
- Jayakumar DA, Naqvi SWA, Narvekar PV, George MD. 2001. Methane in coastal and offshore waters of the Arabian Sea. *Mar. Chem.*, **74**: 1-13.
- Koné YJM, Abril G, Delille B, Borges AV. 2010. Seasonal variability of methane in the rivers and lagoons of Ivory Coast (West Africa). *Biogeochemistry*, **100**: 21–37.
- Koné YJM, Abril G, Kouadio KN, Delille B, Borges AV. 2009. Seasonal variability of Carbon Dioxide in the rivers and lagoons of Ivory Coast (West Africa). *Estuaries and Coasts*, **32**: 246–260.
- Middelburg JJ, Nieuwenhuize J, Iversen N, Høgh N, Wilde HD, Helder W, Seifert R, Christof O. 2002. Methane distribution in European tidal estuaries. *Biogeochemistry*, **59**: 95–119.
- Nikiema M, Sawadogo JB, Somda MK, Traore D, Dianou D, Traore AS. 2015. Optimisation de la production de biométhane à partir des déchets organiques municipaux. *Int. J. Biol. Chem. Sci.*, **9**(5): 2743-2756.
- Predotova M, Gebauer J, Diogo RVC, Schlecht E, Buerkert A. 2010. Emissions of ammonia, nitrous oxide and carbon dioxide from urban gardens in Niamey, Niger. *Field Crop. Res.*, **115**: 1–8.
- Predotova M, Gebauer J, Diogo RVC, Schlecht E, Buerkert A. 2010. Emissions of ammonia, nitrous oxide and carbon dioxide from urban gardens in Niamey, Niger. *Field Crop. Res.*, **115**: 1- 8.
- Rajkumar AN, Barnes J, Ramesh R, Purvaja R, Upstill-Goddard RC. 2008. Methane and nitrous oxide fluxes in the polluted Adyar River and estuary, SE India. *Mar. Pollut. Bull.*, **56**: 2043–2051.
- Ren Q-Y, Chen G-J, Yan W, Guo T-M. 2000. Interfacial Tension of (CO₂+ CH₄) + Water from 298 K to 373 K and Pressures up to 30 MPa. *J. Chem. Eng. Data*, **45**: 610-612.
- Rodier J, Legube B, Merlet N. 2016. L'analyse de l'eau : eaux naturelles, eaux résiduaires, eau de mer.

- Collection : Technique et Ingénierie (10^{ème} Edition). Dunod : p1824.
- Seguin B, Soussana JF. 2008. Emissions de gaz à effet de serre et changement climatique : causes et conséquences observées pour l'agriculture et l'élevage. *Courrier de l'Environnement de l'INRA* n°55.
- Traoré ElH, Thior Y ElH, Ickowicz A, Missohou A, Diop AT, Lecompte P. 2016. Estimation de la variabilité de la digestibilité et des émissions de méthane (CH₄) des régimes des ruminants en fonction de la saison sur parcours sahélien. *Int. J. Biol. Chem. Sci.*, **10**(2): 543-551.
- Upstill-Goddard RC, Bames J, Frost T, Punshon S, Owens NJP. 2000. Methane in the southern North Sea : Low-salinity inputs, estuarine removal, and atmospheric flux. *Global Biogeochem. Cy.*, **14**(4): 1205-1217.
- Widory D, Petelet-Giraud E, Négrel P, Ladouche B. 2005. Tracking the sources of nitrate in groundwater using coupled nitrogen and boron isotopes: A synthesis. *Environ. Sci. Technol.*, **39**(2): 539-548.