



Doctoral Thesis

Nutrient cycling and methane production in Lake Kivu

Author(s):

Pasche, Natacha

Publication Date:

2009

Permanent Link:

<https://doi.org/10.3929/ethz-a-005951666> →

Rights / License:

[In Copyright - Non-Commercial Use Permitted](#) →

This page was generated automatically upon download from the [ETH Zurich Research Collection](#). For more information please consult the [Terms of use](#).

Diss. ETH No.18606

Nutrient cycling and methane production in Lake Kivu

A dissertation submitted to
SWISS FEDERAL INSTITUTE OF TECHNOLOGY ZURICH
for the degree of
DOCTOR OF SCIENCES

presented by
NATACHA PASCHE
Dipl. d'ingénieure en environnement, EPFL
born 28th March 1980
citizen of Oron-la-Ville

accepted on the recommendation of
Prof. Dr. Alfred Wüest, examiner
Dr. Martin Schmid, co-examiner
Prof. Dr. Bernhard Wehrli, co-examiner
Prof. Dr. Jean-Pierre Descy, co-examiner

2009

Abstract

Lake Kivu is situated in the East African Rift Valley near the equator at an elevation of 1463 m. The lake is bordered by two active volcanoes to the north and is shared between the Republic of Rwanda and the Democratic Republic of the Congo. This large lake has a surface of 2370 km², a maximum depth of 485 m and a total volume of 580 km³. It has an unusual permanent density stratification, which is sustained by salty, warm and CO₂-rich subaquatic springs. In the permanently stratified anoxic hypolimnion, exceptional amounts of CH₄ (~60 km³) and CO₂ (~300 km³) have been accumulating over hundreds of years. Nowadays, gas saturation reaches up to ~55%. It has been estimated that CH₄ concentrations increased by up to 15% between 1974 and 2004, and that 100% saturation could be approached around the year 2100. A potential gas eruption could have catastrophic consequences for this densely populated region. CH₄ extraction could be an attractive solution providing electricity for the bordering countries and reducing the risk of eruption. Quantifying the CH₄ production rate is, therefore, important to evaluate the risk of outgassing and efficiently use the CH₄ as an energy source.

We suppose that the CH₄ increase is due to one or a combination of the following three hypotheses: (i) the external nutrient inputs to the lake may have increased due to the fast-growing population in the catchment area; (ii) the introduction of *Limnothrissa Miodon*, the first pelagic and zooplanktivorous fish, may have induced food web alterations favouring phytoplankton growth; and (iii) higher rainfall during 1960-1990 could have induced higher subaquatic inflows, increasing the lake-internal upwelling and the nutrient fluxes to the epilimnion. We assume that a higher nutrient availability caused an increased primary production and that nutrient cycling is closely coupled with CH₄ production. The quantification of the lake nutrient cycling is therefore necessary to understand which nutrient inputs drive the primary production and thus CH₄ production in Lake Kivu.

This study investigated phosphorus (P), nitrogen (N), and silica (Si) cycling in the lake. Our analyses revealed that N and P cycles are dominated by internal processes (upwelling and burial). P and N external inputs supply only 10% (P) to 25% (N) of the total inputs to the epilimnion. In contrast, Si inputs are divided in equal parts between inflowing rivers and upwelling. The major input to the epilimnion is therefore the upwelling, which transports the accumulated nutrients from the deep water to the surface. In conclusion, only a modification of the internal transport might lead to a significantly increased nutrient availability. The external inputs have a much shorter time scale than the residence time of the nutrients in the lake, thus their impact could not be responsible for a rapid increase.

In Lake Kivu, CH₄ is produced from two distinct sources of carbon: organic carbon and magmatic CO₂. Similarly to other lakes, the degradation of organic matter produces CH₄ in the anoxic zone. However, ¹⁴C_{CH4} modelling indicates that below 260 m, a large part of CH₄ originate from the reduction of magmatic CO₂. As organic matter is not sufficient to sustain this production, we suppose that the subaquatic springs deliver magmatic H₂ or geogenic CH₄ in the deep water. Despite the huge amount of CH₄ in the lake, type X methanotrophs efficiently oxidize CH₄ aerobically

and only ~3% of CH₄ escapes to the atmosphere. Anaerobic CH₄ oxidation is of minor importance.

The analyses of sediment cores revealed an abrupt change in the 1960s, when carbonate precipitation increased massively. Since then, organic matter accumulation has also considerably risen. Concurrently, ¹⁴C_{CH₄} and δ¹³C_{CH₄} changes indicate that CH₄ produced from organic material has increased. These modifications point toward an increased primary production, leading to a higher CH₄ production.

In conclusion, many indices suggest that Lake Kivu has been strongly modified. We propose that the primary production has been enhanced by an increase of the nutrient inputs. The eutrophication is not the consequence of the increasing human population in the catchment. The main cause seems to originate from an internal modification of the upwelling, delivering more nutrients to the epilimnion. We assume that the discharge of subaquatic springs has been increased by the higher rainfall recorded between 1960 and 1990. In parallel, *Limnothrissa Miodon* has probably exerted more pressure on the zooplankton, which would have loosened control over the phytoplankton. In the epilimnion, the recycling and export of the organic matter could have changed due to the shift in zooplankton and phytoplankton communities. Thus, the observed CH₄ increase resulted from a combination of hydrological changes and food web alterations, and could be a transient phenomenon.

Finally, this study determined Lake Kivu's current nutrient and carbon cycling. It therefore serves as starting conditions to monitor potential changes caused by the future CH₄ extraction. This exploitation would have the advantage of both reducing the outgassing risk and providing electricity for the region.

Résumé

Au cœur du grand rift Est-Africain, le lac Kivu est partagé entre la République Démocratique du Congo et le Rwanda. A une altitude de 1463 m, ce grand lac d'une superficie de 2370 km² et d'une profondeur maximale de 485 m est situé au sud de deux volcans actifs. Des sources subaquatiques chaudes, salées et riches en gaz carbonique (CO₂) maintiennent une stratification permanente de la colonne d'eau. Au sein de l'hypolimnion anoxique, des quantités exceptionnelles de méthane (CH₄; ~60 km³) et de CO₂ (~300 km³) se sont accumulées durant des centaines d'années. Actuellement, la saturation des gaz est de 55%. Une étude récente a démontré que les concentrations de CH₄ avaient augmenté de 15% entre 1974 et 2004 et que le 100% de saturation pourrait être atteint d'ici 2100. Une éruption potentielle des gaz aurait des conséquences catastrophiques pour cette région densément peuplée. L'exploitation du CH₄ constituerait une solution doublement intéressante tant par l'électricité fournie à chaque pays que par la réduction des risques. La quantification de la production de CH₄ est donc importante pour évaluer ce risque et pour l'utiliser efficacement en tant que source d'énergie.

L'augmentation de CH₄ pourrait provenir de l'une ou plusieurs hypothèses suivantes : (i) origine anthropique : la population grandissante du bassin versant pourrait avoir augmenté les apports externes de nutriments; (ii) origine biologique : l'introduction de *Limnothrissa Miodon*, le premier poisson pélagique et zooplanctonivore, pourrait avoir altéré le réseau trophique et ainsi favorisé la croissance du phytoplancton; et (iii) origine climatique : les fortes pluies enregistrées entre 1960 et 1990 pourraient avoir renforcé le débit des sources subaquatiques, entraînant une remontée accrue des nutriments dans l'épilimnion. Nous supposons que le plus grand apport de nutriments a causé un accroissement de la production primaire, et que les cycles des nutriments sont étroitement liés à la production de CH₄. La quantification de ces cycles est donc nécessaire pour comprendre quelles sources de nutriments engendrent la production primaire, et par conséquent la production de CH₄.

Nos analyses ont révélé que les cycles de N et de P sont dominés par les processus internes. Les apports externes de P et de N ne fournissent que 10% (P) à 25% (N) des apports totaux à l'épilimnion. En revanche, les apports de Si sont pour moitié d'origine externe (rivières) et pour moitié interne (hypolimnion). Les principaux fournisseurs de nutriments de l'épilimnion sont donc les courants ascendants, qui entraînent les nutriments accumulés en couche profonde à la surface. Ainsi seule une modification du transport interne est suffisante à expliquer une augmentation de leurs concentrations. Les apports externes ont un temps de résidence bien plus court que les nutriments accumulés dans le lac, et leurs impacts ne peuvent donc pas engendrer de rapides augmentations.

Dans le Lac Kivu, la production de CH₄ a une double origine : la matière organique et le CO₂ magmatique. Comme pour d'autres lacs, la dégradation de la matière organique dans la zone anoxique fournit du CH₄. Pourtant, la modélisation de ¹⁴C_{CH4} a montré qu'en dessous de 260 m, la majeure partie du CH₄ provient de la

réduction du CO₂ magmatique. Comme la matière organique n'est pas en quantités suffisantes pour expliquer cette production, nous supposons que les sources subaquatiques apportent de l'H₂ magmatique (ou du CH₄) dans les eaux profondes. Malgré son énorme réservoir, des méthanotrophes du type X oxydent efficacement le CH₄ par l'oxygène et seulement ~3% s'échappe dans l'atmosphère. L'oxydation anaérobie du CH₄ est de faible importance.

L'analyse de carottes de sédiments révèle un changement abrupt aux environs de 1960 caractérisé par une précipitation massive de carbonates. Depuis cette date, l'accumulation de la matière organique a considérablement augmenté. Parallèlement, une modification de $^{14}\text{C}_{\text{CH}_4}$ et $\delta^{13}\text{C}_{\text{CH}_4}$ indique que le CH₄ produit par la matière organique s'est accru. Ces modifications semblent pointer vers une augmentation de la production primaire, engendrant une production supérieure de CH₄.

En conclusion, plusieurs indices concordants confirment qu'une modification du fonctionnement du lac Kivu est intervenue. Nous proposons que la productivité biologique du lac s'est accrue en conséquence d'un changement d'apports en nutriments. Cette eutrophisation n'est pas imputable à une perturbation anthropique au sein du bassin versant. La cause principale semble plutôt être due à une augmentation du transport ascendant, entraînant plus des nutriments à la surface. Nous supposons que le débit des sources profondes a augmenté suite aux fortes pluies recensées des années 1960 à 1990. Simultanément, *Limnothrissa Miodon* a probablement exercé une pression plus forte sur le zooplancton, qui a diminué son contrôle sur le phytoplancton. Ces changements biologiques ont probablement modifié le recyclage et l'exportation de la matière organique dans l'épilimnion. En conséquence, l'accroissement observé du CH₄ serait le résultat d'une modification hydrologique combinée à l'altération du réseau trophique, et pourrait n'être qu'un phénomène transitoire.

En définitive, cette étude a déterminé les cycles actuels des nutriments et du carbone du Lac Kivu, et servira d'état initial pour le monitoring de l'extraction du CH₄. Cette exploitation permettra de réduire les risques d'éruption tout en développant durablement l'économie régionale.