

Académie d'Aix Marseille
Université d'Avignon et des Pays de Vaucluse

THESE

Pour obtenir le grade de docteur de l'Université d'Avignon et des Pays de Vaucluse

Discipline: Sciences de la Terre (*Earth sciences*)

Spécialité: Hydrogéologie (*Hydrogeology*)

APPROCHES ISOTOPIQUE ET GEOCHIMIQUE POUR L'ETUDE DES EAUX SOUTERRAINES ET
DES LACS : EXEMPLES DU HAUT BASSIN DU NIL BLEU ET DU RIFT ETHIOPIEN

Environmental isotopes and geochemistry in investigating groundwater and lake hydrology: cases from
the Blue Nile basin & the Ethiopian Rift (Ethiopia)

Présenté par (by)

SEIFU KEBEDE

le 10 décembre 2004

JURY

M. Edmunds	Professor	Université d' Oxford, Center for Water Research	Rapporteur
J.L. Michelot	CNRS	Université de Paris Sud, Labo. Hydrol. Isotopique	Rapporteur
Y. Travi	Professeur	Université d'Avignon, Labo. Hydrogéologie	Directeur de Thèse
T. Alemayehu	Asso. Professor	Addis Ababa University, Geology Department	Examineur
K. Rozanski	Professor	University of Krakow, Dept. Nuclear & Env. Physics	Examineur
P. Aggarwal	Doctor	Head, Isotope Hydrology Section, IAEA	Examineur
B. Blavoux	Professeur	Université d' Avignon, Labo. Hydrogéologie	Examineur

Résumé

On utilise les isotopes de l'environnement ($\delta^{18}\text{O}$, δD , $\delta^{13}\text{C}$, ^3H) et l'hydrogéochimie pour étudier le fonctionnement hydrologique des eaux souterraines et des lacs sur des secteurs sélectionnés en Ethiopie. Il s'agit de la dépression de l'Afar, du Rift Ethiopien et du haut bassin du Nil Bleu. On s'intéresse tout d'abord à la relation entre le climat et la composition des eaux météoriques. Les conclusions obtenues sont ensuite utilisées pour l'étude des eaux souterraines et des lacs.

La variation saisonnière de $\delta^{18}\text{O}$ et δD des eaux de pluie sur l'Ethiopie est principalement sous la dépendance du mouvement saisonnier de la ZITC, et des origines et des trajectoires associées de l'humidité atmosphérique. Une fois que l'humidité issue des principales sources (Océans Indien et Atlantique ou évaporation continentale) atteint les reliefs éthiopiens, la composition isotopique de la pluie est modifiée par les effets locaux d'altitude, de température et de masse. Un exemple typique est donné par l'appauvrissement en $\delta^{18}\text{O}$ de 0.1 ‰ par 100 mètres lorsque les masses humides se soulèvent le long du versant ouest des montagnes éthiopiennes. Toutefois, aucun de ces effets isotopiques ne paraît avoir une influence prédominante sur la variation spatiale ou temporelle de la composition isotopique des eaux météoriques. C'est pourquoi, la thèse recommande de considérer l'ensemble de ces effets qui peuvent s'opposer ou s'ajouter, plutôt que de mettre en valeur un seul effet, lorsqu'on interprète les signaux isotopiques (dans les eaux météoriques actuelles ou les archives isotopiques paléohydrologiques).

L'identification de différents mécanismes de recharge pour les trois secteurs (Plateau Nord Ouest, Rift Principal et dépression de l'Afar) constitue un des principaux résultats. Le taux de fractionnement dû à l'évaporation, avant la recharge, est le plus élevé dans l'Afar et le plus faible sur le Plateau Nord Ouest. Dans l'Afar la principale source de recharge provient des bras morts de cours d'eau partiellement évaporés ou d'écoulement de crues en provenance des escarpements qui bordent la dépression ou de la plaine de l'Awash.

En couplant les méthodes géochimiques et isotopiques, ce travail précise également les mécanismes de recharge des eaux souterraines, leur temps de résidence et leur évolution géochimique dans le bassin supérieur du Nil Bleu. Bien que les basaltes du Cénozoïque soient le principal aquifère, plusieurs systèmes hydrogéologiques ont pu être identifiés et décrits sur la base des données hydrogéochimiques. Par ailleurs, dans deux secteurs (linéament volcanique de Yerer Tulu Welel -YTVL et graben du lac Tana-GLT) le dioxyde de carbone d'origine profonde joue un rôle important pour le contrôle de l'évolution chimique des eaux souterraines du type NaHCO_3 avec un TDS élevé. Le bassin du Nil Bleu était autrefois considéré comme une région avec un système hydrogéologique simple constitué d'aquifères de roches cristallines.

L'application de la méthode du bilan isotopique à quelques lacs éthiopiens sélectionnés montre que la méthode est plus performante en comparant l'état hydrologique des lacs et en calculant les flux d'eau souterraine autour des lacs. On propose d'utiliser une droite d'évaporation théorique locale comme référence pour comparer les compositions isotopiques (actuelles ou anciennes) des lacs étudiés et obtenir ainsi des informations hydrologiques immédiates.

Mots clés: isotopes de l'environnement, effets isotopiques, recharge en eau souterraine, bilan de lac, Nil Bleu, Rift Ethiopien, Ethiopie

Abstract

This work uses environmental isotopes ($\delta^{18}\text{O}$, δD , $\delta^{13}\text{C}$, ^3H) and geochemistry in groundwater and lake hydrological studies of selected sites from Ethiopia. The sites are the Afar Depression, the Main Ethiopian Rift and the Blue Nile Basin. The thesis first investigates the relationship between the seasonal and spatial variations in the isotopic composition of Ethiopian meteoric waters and the Ethiopian climate. It then makes use of this understanding in the groundwater and lake hydrological studies.

The seasonal variation in $\delta^{18}\text{O}$ and δD compositions of Ethiopian rainfall waters are mainly influenced by the seasonal drifting of the ITCZ and associated changes in sources of moisture or associated changes in moisture trajectory. Once the moisture mass from the major sources (Indian, Atlantic or continental) reaches the region, its $\delta^{18}\text{O}$ and δD compositions is modified by the local altitude effect, the temperature effect and the amount effect. A clear example is the 0.1 ‰ per 100 meter depletion in $\delta^{18}\text{O}$ as moisture mass moves upward over Ethiopian mountains facing west. The relation between spatial variation in mean air temperature and the spatial variation isotopic composition of meteoric waters has the form: $\delta^{18}\text{O} = 0.21 T_{\text{air}} (\text{°C}) - 6.5$. However, none of the isotope effect seems to dominate the other in influencing the spatial and temporal variation in isotopic composition of meteoric waters. Therefore, the thesis recommends that when one interprets the isotope signals (in modern meteoric waters or in paleo isotope record from archives) from the region one should consider the interplay of all effects that reinforce or cancel each other rather than singling out one isotope effect.

One of the major results of the thesis is the identification of differences in ground recharge mechanisms of the three sectors (North Western Plateau, the MER, and Afar Depression) of the study region. The degree of evaporative fractionation prior to recharge is the highest in Afar Depression and the lowest in the NWP. In Afar the major source of groundwater recharge is from 'incompletely' evaporated losing streams or flush floods converging towards the Afar Depression from the bordering escarpments and from infiltration by Awash flood plain water.

By coupling the isotopic and the geochemical methods this thesis also shows groundwater recharge mechanisms, its subsurface residence time and its geochemical evolution in the Upper Blue Nile Basin. Although the Cenozoic basalt is the principal aquifer in the upper Blue Nile Basin, multiple geochemically recognizable groundwater bodies/layers have been identified. This allows to describe different hydrogeological systems. Furthermore in two zones (the Yerer Tulu Welel Volcanic Lineament-YTVL and the Lake Tana Graben-LTG) carbon dioxide from deeper sources plays an important control on geochemical evolution of the high TDS NaHCO_3 type groundwaters. The Blue Nile basin was previously considered as a region with simple hydrogeology underlain by crystalline aquifers.

The isotope balance study of selected Ethiopian lakes shows that the isotopic lake balance method is more powerful in comparing the hydrological status of lakes and in computing groundwater flux around lakes. The thesis proposes a hypothetical local evaporation line for Ethiopia as a reference with which the isotopic composition (present or ancient from archives) of any lake could be compared to gain rapid hydrological information. The technique developed in this thesis has wider application in wet land and interconnected lake system studies including the analysis of degree of lake interconnectivity and wetland interconnectivity. The method is also used to quantify groundwater flux around lakes.

Key words: *environmental isotopes, isotope effects, groundwater recharge, lake water balance, Blue Nile Basin, Ethiopian Rift, Ethiopia*