

Structure de la sismicité de la Branche occidentale des Rifts Valleys du système des Rifts Est-africains : de 1954 à 2010

[Structure of the seismicity of the Western Branch of the Rifts Valleys of Rifts system East African : from 1954 to 2010]

Bantidi Matondo¹, Mukange Besa¹, and Zana Ndontoni¹⁻²

¹Departement de Physique, Faculté des Sciences, Université de Kinshasa, Kinshasa, RD Congo

²Centre de Recherche en Géophysique (CRG), Kinshasa, RD Congo

Copyright © 2014 ISSR Journals. This is an open access article distributed under the ***Creative Commons Attribution License***, which permits unrestricted use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

ABSTRACT: Analysis of seismic parameters calculated such as spatial and temporal distribution of epicenters, seismic energy released, maximum magnitude recorded or calculated, in different zones under consideration of the western rift valleys branch classifying in many under zones (south Sudan, lake Albert, lake Edouard, lake Kivu, lake Tanganyika, Upemba rift, north of Zambia, lake Rukwa and lake Malawi) leads up to the establishment of the advanced seismic zoning map of seismic areas. In this study we observed:

- The major seismic activity is located faults zones;
 - The seismic zoning shows that the seismic activity of western rift valleys is focused into three main zones:
 - 1°) In the western north of south Sudan;
 - 2°) In the lake Kivu, lake Tanganyika and lake Rukwa;
 - 3°) In lake Malawi. The seismic activity of the Lake Malawi show many similarities with the seismic activity of the lake Rukwa.
 - The seismic zoning shows low seismic activity in inter basins zones where the high volcanoes activity is localized;
 - The major earthquakes are correlated at the high seismic activity;
 - The seismic zoning shows the real possibility to indicate the fault location, when the zone is subdivided into four groups;
 - The seismic activity is not equitably repartee in the zone;
- The seismic energy released is moderate but, the Lake Kivu and the Lake Tanganyika shows the high seismic activity comparatively at an others zones. We can imagine the complex mineralogy and permanent features.

KEYWORDS: characterization, seismicity, western branch, seismic zoning, rift valleys, faulting.

RESUME: L'analyse des paramètres sismiques calculés tels que la distribution spatiale et temporelle des épicentres, l'énergie sismique libérée, l'activité sismique, la magnitude maximale enregistrée ou calculée sur les zones de la branche occidentale subdivisées en sous zones (Sud – Soudan, lac Albert, lac Edouard, lac Kivu, lac Tanganyika, rift de l'Upemba, Nord–Zambie, lac Rukwa et le lac Malawi) débouche essentiellement à l'établissement de la carte de zonage sismique. L'étude a révélé que :

- L'activité sismique est intense tout au long (ou dans) des zones de fractures ;
 - Le zonage sismique montre que la sismicité de la branche occidentale se concentre en trois endroits principaux :
 - 1°) au Nord, dans la zone Sud – Soudan ;
 - 2°) au centre, dans l'axe lac Kivu - lac Tanganyika – lac Rukwa ;
 - 3°) au sud : au lac Malawi avec une forte ressemblance entre le lac Rukwa et Malawi.
 - Le zonage sismique montre enfin que l'activité sismique de la branche occidentale est faible dans les zones interbassins qui, souvent, sont le siège d'une activité volcanique intense.
 - Aux grands séismes correspond une fréquence élevée ou une activité sismique élevée.
 - Le zonage sismique laisse entrevoir la possibilité d'identifier l'orientation des failles dans une zone subdivisée en, au moins, quatre sous zones
 - La subdivision de chaque zone en sous zones a révélé la diversité de leur activité sismique
- Bien que leur énergie libérée soit relativement faible, néanmoins, le lac Kivu et Tanganyika présentent une activité sismique plus intense que d'autres zones, indicatrice d'une fracturation persistante de la structure peut être également d'une minéralogie assez particulière.

MOTS-CLEFS: structure, sismicité, branche occidentale, zonage sismique, fracturation, rifts – Valleys.

1 INTRODUCTION

Le système des Rifts Est-africain se présente comme une extension continentale du système mondial des fractures lithosphériques qui serpentent au milieu des océans Atlantique et Indien d'où il se prolonge dans le Golf d'Aden et la Mer Rouge, il s'étend entre le parallèle 3°N et 10°S. Enfin, du détroit d'Asfar, le système des fossés tectoniques s'étend en Afrique de l'Est où il se subdivise en deux branches (Fig.1) :

- la branche orientale qui couvre l'Ethiopie, le Kenya et la Tanzanie : est nommée « rift Kenyan » ou « rift Grégory » et ;
- la branche occidentale aussi appelée « Rift Ouest Africain » ou « rift des grands lacs » dans l'axe Nord – Sud, dont le lac Kivu occupe la partie centrale. Cette branche révèle plusieurs spécificités aussi bien du point de vue géologique que géodynamique.

De la mer Rouge au Zambèze, les Rifts Est-Africains couvrent plus de 6000 km de long sur 40 à 60 km de large. Notons que les deux branches orientale et occidentale qui se séparent en deux au niveau du linéament d'Assouan font une jonction au niveau du lac Malawi [1].

Le Rift Ouest Africain constitue un phénomène géodynamique composé d'un alignement de plusieurs fossés d'effondrement séparés par des failles au niveau desquels se sont formés les grands lacs alignés suivant un arc comprenant du Nord au sud: le lac Albert (altitude 617m), le lac Edouard (altitude 912 m), le lac Kivu (altitude 1462 m), le lac Tanganyika (altitude 780 m), le lac Rukwa (782 m), le lac Malawi (Nyassa) (altitude 460m), [2] , [3].

L'activité sismique enregistrée dans la zone système des Rifts Est-africain (Fig.2) et l'étendue des zones qu'elle affecte révèle la nécessité de sa caractérisation en vue de l'évaluation du potentiel en risque sismique. Cette évaluation doit être constamment et régulièrement actualisée aux vues de nouvelles données et traduite sous forme de carte de zonage sismique. Dans ce travail, nous nous intéressons à la branche occidentale.

La structure de la branche occidentale du rift est-africain (Figure 2.3) est marquée par trois principales directions structurales, le NE-SW (lac Albert, lac Edouard, lac Kivu), le N-S (partiellement les uns et les autres) et le NW-SE (lac Tanganyika, lac Rukwa, lac Malawi). Toute l'orogénèse des lacs s'explique par le jeu mutuel de divers compartiments de ces copeaux de la lithosphère tassés au fond du rift et inégalement affaissés [4]. Ce nœud, où s'opère la rencontre de toutes les fractures de deux systèmes conjugués, fut le siège d'importantes éruptions volcaniques. Les failles bordières des bassins sont généralement normales et les provinces volcaniques (Fig.3) se localisent dans les zones interbassins ; le rift Ouest Africain compte trois principales provinces volcaniques : la province du Toro-Ankole, la province du Sud-Kivu et la province des Virunga (avec, en l'occurrence, les volcans Nyiragongo et Nyamulagira), [5].

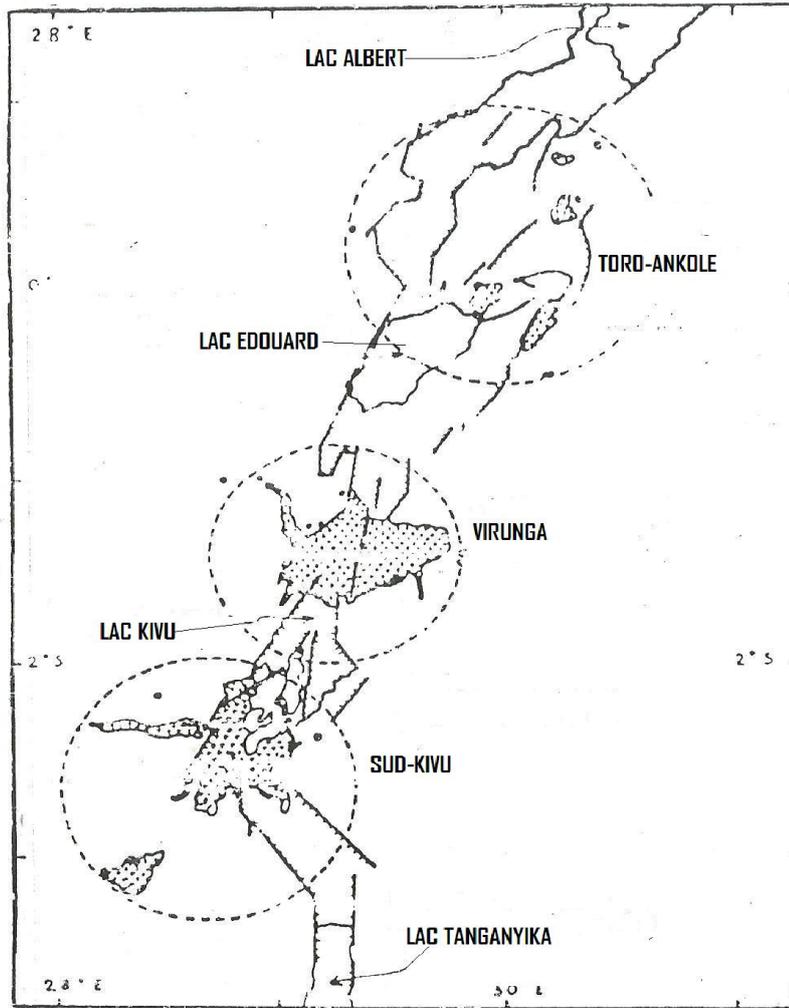


Fig. 3: Les aires volcaniques du rift congolais.

De manière générale, l'activité volcanique du rift Est – Africain est représentée dans la figure ci – dessous :



Fig.4. Activité volcanique du Rift

2 DONNEES ET METHODE D'ANALYSE

2.1 DONNÉES D'ANALYSE

Les données sismiques analysées dans cette étude sont celles obtenues sur le site de l'United States Geological Survey, USGS en sigle, [6] ainsi que celles tirées des bulletins CRSN / LWIRO (IRSAC) pour la période allant de 1954 à 2010 pour les séismes de magnitudes $m_b \geq 4.0$. Le choix de la magnitude des ondes de volume, notée m_b , est justifié d'abord par le fait que la quasi-totalité des magnitudes est exprimée dans cette échelle, et que cette dernière montre peu d'écart entre les valeurs fournies par diverses institutions géophysiques. La zone étudiée s'étend de latitude $4^\circ N$ à $14^\circ S$ et de longitude 12° à $35^\circ E$ (Fig.2).

La zone étudiée a été subdivisée en sous zones tel que illustre la Figure et tableaux suivants :

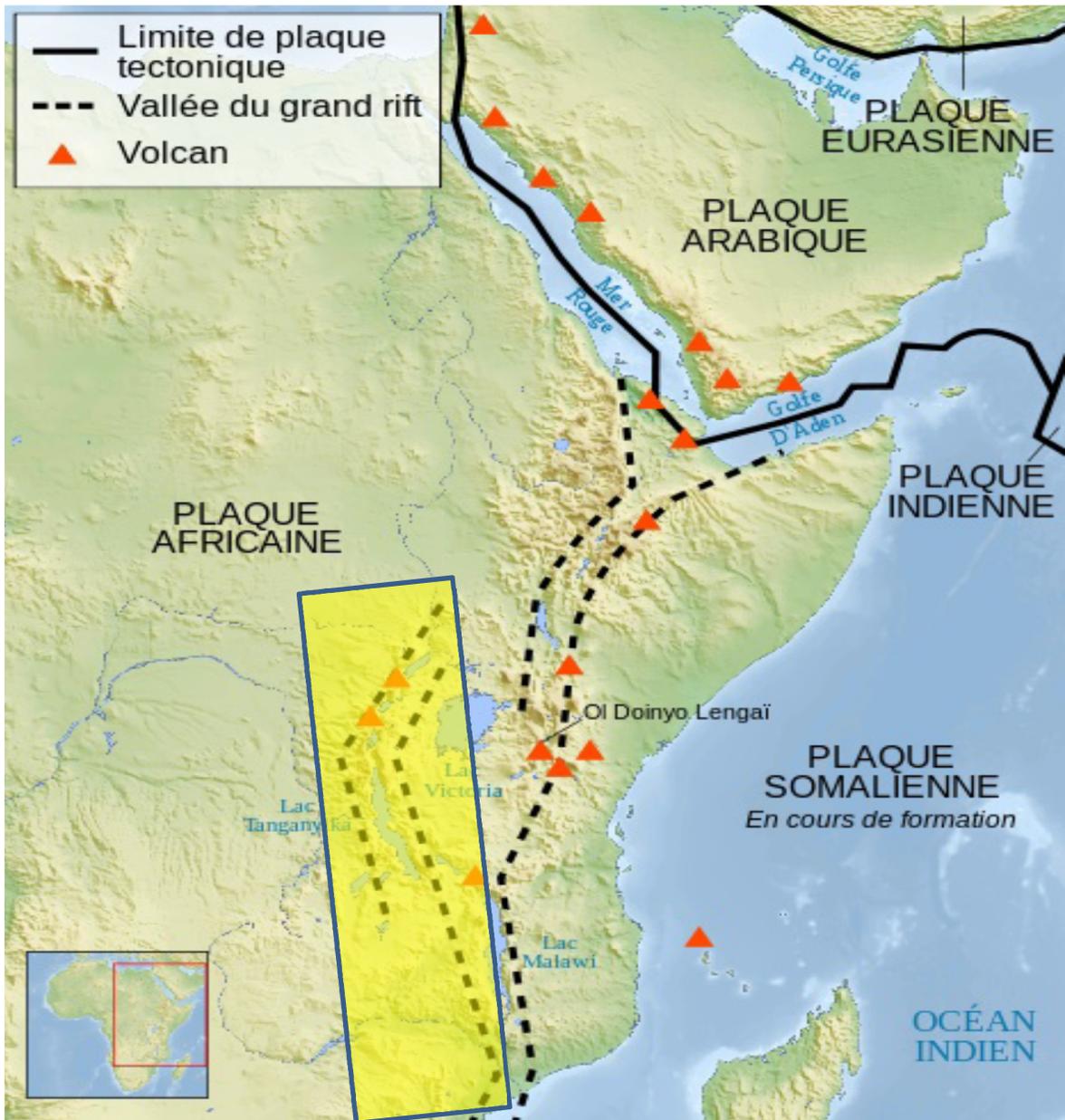


Fig.5 : Présentation des limites de la zone à l'étude en jaune

Les trois tableaux ci-dessous présentent les détails relatifs à chaque zone.

Tableau 1.a : Description des zones étudiées

Zones	Delimitation de la zone		Nombre de séismes enregistrés
	Longitude (°)	Latitude (°)	
SUD – SOUDAN (SS)	30,0 E – 34,0 E	LAT. 3,6 N – 6,0 N	84
LAC ALBERT (A)	28,3 °E – 33 °E	3,7 °N - 1,6 °N	58
LAC EDOUARD (E)	28,3 °E – 32 °E	0,5 °S- 1,51 °N	199
LAC KIVU (K)	26 °E – 30 °E	3,7°S – 0,5 °S	373
LAC TANGANYIKA (T)	29 °E-31,3°E	9 °S – 3 °S	390
ZONE MIXTE (RIFT DE L’UPEMBA) (M)	24,12 E – 31,33E	5,17 S – 14,6 S	183
LAC RUKWA (R)	31,0 E – 32,3 E	7,0 S – 9,0 S	46
LAC MALAWI (M)	32,0 E – 35,0 E	14,0 S – 9,0 S	47

Les différentes zones décrites ci-dessus sont ensuite subdivisées chacune en sous zones (Tableau 1.b) :

Tableau 1.b : Description des sous zones de chaque zone.

Sous zones du Lac Tanganyika (T)	Délimitation approximative de la zone.		Nombre de séismes enregistrés.
	Longitude (°)	Latitude (°)	
T _O	29 °E - 30,15 °E	9 °S – 3 °S	234
T _E	30,15 °E - 31,3 °E	9 °S – 3 °S	156
T _{NO}	29 °E - 30,15 °E	5 °S – 3 °S	122
T _{NE}	30,15 °E - 31,3 °E	5 °S – 3 °S	16
T _{CO}	29 °E - 30,15 °E	7 °S – 5 °S	89
T _{CE}	30,15 °E - 31,3 °E	7 °S – 5 °S	58
T _{SO}	29 °E - 30,15 °E	9 °S – 7 °S	23
T _{SE}	30,15 °E - 31,3 °E	9 °S – 7 °S	82
Sous zones du Lac Kivu (K)			
Sous zones du Lac Kivu (K)	Délimitation approximative de la zone.		Nombre de séismes enregistrés.
	Longitude (°)	Latitude (°)	
K _O	26 °E - 28 °E	3,7 °S – 0,5 °S	66
K _E	28 °E - 30 °E	3,7 °S – 0,5 °S	307
K _{N-O}	26 °E - 28 °E	2,1 °S – 0,5 °S	46
K _{N-E}	28 °E - 30 °E	2,1 °S – 0,5 °S	133
K _{S-O}	26 °E - 28 °E	3,7 °S – 2,1 °S	20
K _{S-E}	28 °E - 30 °E	3,7 °S – 2,1 °S	174

Tableau 1.b (suite) : Description des sous zones de chaque zone.

Sous zones du Lac Edouard (E)	Délimitation approximative de la zone.		Nombre de séismes enregistrés.
	Longitude (°)	Latitude (°)	
E _O	28,3 °E – 30,15 °E	0,5 °S- 1,51 °N	141
E _E	30,15 °E – 32 °E	0,5 °S- 1,51 °N	58
E _{N-O}	28,3 °E – 30,15 °E	1,51 °N - 0,505 °N	69
E _{N-E}	30,15 °E – 33 °E	1,51°N - 0,505 °N	42
E _{S-O}	28,3 °E – 30,15 °E	0,5 °S - 0,505 °N	72
E _{S-E}	30,15 °E – 32 °E	0,5 °S - 0,505 °N	16
Sous zones du Lac Albert (A)			
Sous zones du Lac Albert (A)	Délimitation approximative de la zone.		Nombre de séismes enregistrés.
	Longitude (°)	Latitude (°)	
A _O	28,3 °E – 30,65 °E	3,7 °N - 1,6 °N	5
A _E	30,65 °E – 33 °E	3,7 °N - 1,6 °N	53
A _{N-O}	28,3 °E – 30,65 °E	3,7 °N - 2,65 °N	1
A _{N-E}	30,15 °E – 33 °E	3,7 °N - 2,65 °N	10
A _{S-O}	28,3 °E – 30,65 °E	2,65 °N - 1,6 °N	4
A _{S-E}	30,65 °E – 33 °E	2,65 °N - 1,6 °N	43

NB : O signifie Ouest signifie Est, N signifie Nord et S signifie Sud

Tableau 1.c : Description des autres zones

Sous zones de la zone SUDAN (SS)	Délimitation approximative de la zone.		Nombre de séismes enregistrés.
	Longitude (°)	Latitude (°)	
NORD – EST(SS _{NE})	32,1 E – 34,0 E	4,81 N – 6,0 N	33
NORD – OUEST(SS _{NO})	30,0 E – 32,0 E	4,81 N – 6,0 N	23
SUD – EST (SS _{SE})	32,1 E – 34,0 E	3,6 N – 4,8 N	10
SUD – OUEST(SS _{SO})	30,0 E – 32,0 E	3,6 N – 4,8 N	18
Sous zones de la zone ZONE MIXTE (RIFT DE L'UPEMBA)			
Sous zones de la zone ZONE MIXTE (RIFT DE L'UPEMBA)	Délimitation approximative de la zone		Nombre de séismes enregistrés.
	Longitude	Latitude	
NORD – EST (M _{NE})	27,73 E – 31,33 E	9,89 S – 5,17 S	60
NORD – OUEST (M _{NO})	24,12 E – 27,72 E	9,89 S – 5,17 S	17
SUD – EST (M _{SE})	27,73 E – 31,33 E	14,6 S – 9,88 S	26
SUD – OUEST (M _{SO})	24,12 E – 27,72 E	14,6 S – 9,88 S	80
Sous zones de la zone LAC RUKWA			
Sous zones de la zone LAC RUKWA	Délimitation approximative de la zone		Nombre de séismes enregistrés.
	Longitude	Latitude	
NORD – EST (R _{NE})	31,66 E – 32,3 E	7,99 S – 7,0 S	13
NORD – OUEST (R _{NO})	31,0 E – 31,65 E	7,99 S – 7,0 S	14
SUD – EST (R _{SE})	31,66 E – 32,3 E	9,0 S – 8,0 S	8
SUD – OUEST (R _{SO})	31,0 E – 31,65 E	9,0 S – 8,0 S	11

Sous zones de la zone LAC MALAWI	Délimitation approximative de la zone		Nombre de séismes enregistrés.
	Longitude	Latitude	
NORD – EST (ML _{NE})	33,51 E – 35,0 E	11,49 S – 9,0 S	17
NORD – OUEST (ML _{NO})	32,0 E – 33,5 E	11,49 S – 9,0 S	11
SUD - EST (ML _{SE})	33,51 E – 35,0 E	14,0 S - 11,5 S	14
SUD - OUEST (ML _{SO})	32,0 E – 35,0 E	14,0 S – 9,0 S	5

Les données recueillies sur la sismicité de la région sous étude ont permis de déduire, dans chaque zone, pour la période allant de 1954 à 2010, les paramètres suivants :

- la distribution spatiale et temporelle des épicentres,
- la distribution des énergies libérées,
- la fréquence de séismes et la période de récurrence,
- la magnitude maximale possible calculée ou enregistrée dans chaque zone,

2.2 MÉTHODE D'ANALYSE

Pour la mise en évidence de la spécificité de la sismicité de la branche occidentale, les données collectées sont analysées en faisant usage d'artifices mathématiques couramment exploitées en sismologie. Les paramètres étudiés dans chaque zone sont :

2.2.1 LA DISTRIBUTION TEMPORELLE DES PARAMETRES SISMIQUES

Une série chronologique est une série statistique obtenue en étudiant l'évolution d'un phénomène ou paramètre en fonction du temps. Dans un repère cartésien, on représente la série statistique à deux variables par les points M_i de coordonnées x_i et y_i . L'ensemble de ces points constitue ce qu'on appelle nuage de points [7]. Dans notre cas, x_i représente l'année ou le mois et y_i le paramètre à l'étude (nombre de séismes, magnitude maximale, énergie, activité sismique...); il s'agit des paramètres ci-dessous.

a) Le nombre de séismes : il s'agit de déterminer le nombre total de séismes enregistrés par année ou par mois cumulé sur 36 ans dans chaque zone à l'étude; nous avons ainsi procédé au comptage cumulé d'événements survenus dans chaque zone.

b) La magnitude maximale possible: la magnitude maximale possible, notée m_{bmax} , est définie comme étant la magnitude la plus élevée enregistrée par année ou par mois.

c) La fréquence relative de séismes : La fréquence relative des séismes est le rapport entre le nombre total (N) des séismes qui se sont produits dans une zone donnée par la période considérée ; ce paramètre fournit aussi une indication sur l'activité sismique, c'est-à-dire le taux d'accumulation d'énergie.

d) La période de récurrence :

La période de récurrence (T) mesure le temps, en année, qui sépare l'occurrence d'un séisme de même magnitude ; c'est en fait le rapport entre la période (P) considérée et le nombre total (N) de séismes enregistrés dans une zone donnée pour la même période. Nous pouvons l'écrire:

$$T = \frac{P}{N} \quad (1)$$

La période de récurrence est l'inverse de la fréquence. Nous pouvons la calculer de deux manières:

➤ **Suivant les statistiques** nous exploitons la relation courante établie par Gutenberg(1930)

$$\log N = a - b \cdot m_b \quad (2)$$

Cette relation peut encore s'écrire de la manière suivante en fonction de la magnitude des ondes de surface:

$$\log = a' - b' \cdot M_s \quad (3)$$

Ces relations permettent d'obtenir le nombre total(N) de séismes de magnitude égale ou supérieure à m_b pour une zone et période P données ; d'où

$$N = 10^{a-b.m_b} \quad (4)$$

➤ **Suivant les données d'observation** : Dans ce cas, N est le nombre de séismes enregistrés par classe(C_i) de magnitude dans la zone considérée en exploitant les données d'observation les résultats figurent dans le Tableau 4.

e) L'activité sismique : l'activité sismique moyenne est le rapport entre le nombre total de fois qu'il y a eu occurrence d'au moins un séisme et la période considérée (nombre de mois ou d'années) ; c'est donc le rapport entre les cas favorables sur les cas possibles [8], 36 ans ou 12 mois dans notre cas. Nous avons considéré l'activité **sismique moyenne annuelle** et l'**activité sismique moyenne mensuelle**.

f) L'énergie sismique libérée : l'énergie sismique (E, en erg) libérée par le séisme de magnitude égale à m_b , dans une zone donnée est obtenue à l'aide de la formule ci-dessous [9]:

$$\log E = 5,8 + 2,4m_b \quad (5)$$

qui peut encore s'écrire en fonction de la magnitude des ondes de surface (M_s) :

$$\log E = 11,8 + 1,5M_s \quad (6)$$

Pour ce faire, l'énergie sismique totale libérée dans une zone et pour une période déterminée est la somme des énergies libérées par chaque séisme.

2.2.2 LA DISTRIBUTION SPATIALE DES MAGNITUDES

La distribution spatiale des magnitudes consiste à étudier la répartition de ces magnitudes en fonction de la longitude ou de la latitude à partir des données d'observation. Ainsi, chaque point du repère cartésien aura pour abscisse la longitude ou la latitude et la magnitude en ordonnée [10].

2.2.3 LES STATISTIQUES DE SÉISMES

Soit N le nombre total de séismes qui se sont produits dans une zone déterminée et pour une période précise. A chaque séisme i, appelé aussi événement, on associe une magnitude m_{bi} et un moment sismique M_{oi} . Il en est de même au point 2.2.4, 2.2.5 et 2.2.6.

Les études statistiques faites sur la sismicité par divers auteurs et dans diverses zones du globe reposent sur la relation de Gutenberg(1930):

$$\log N = a - b.m_b \quad (7)$$

où N représente le nombre de séismes de magnitude supérieure ou égale à la magnitude m_b . Nous considérons les événements de magnitude m_b supérieure à quatre par pas de 0,1 jusqu'à la valeur maximale de la magnitude. Les constantes a et b sont obtenues par application de la loi des moindres carrés aux résultats obtenus à partir du tableau statistique (m_{bi} , $\log N_i$). Cette dernière relation permet d'évaluer la période de récurrence et la magnitude maximale possible calculée (m_b) que nous pouvons enregistrer dans une zone sismique donnée, tel que :

$$m_b = \frac{a}{b} \quad (8)$$

Cette magnitude est notée par la suite m_{b1} pour la différencier de celle observée instrumentalement, c'est-à-dire enregistrée à la station, notée m_{b3} . La valeur élevée de la constante b, qui est généralement inférieure à 1, traduit l'existence d'une activité sismique intense ou présence d'essaims dans la zone à l'étude [11].

La relation (7) permet d'évaluer le nombre total, N, de séismes de magnitude supérieur à m_b :

$$N = 10^{a-b.m_b} \quad (9)$$

3 RESULTATS ET DISCUSSION

Les différents résultats obtenus se présentent de la manière suivante :

3.1 LA DISTRIBUTIONS PATIO- TEMPORELLE DES PARAMETRES SISMIQUES

Les résultats obtenus en rapport avec le nombre de séismes, la magnitude maximale, l'énergie sismique en fonction du temps sont repris, à titre illustratif, dans le Tableau 2 ci-dessous.

Tableau 2.a : Extrait des résultats des paramètres temporels calculés pour sous zones de la zone Tanganyika

MOIS	Nombre cumulé de séismes de 1954 à 2010			M_{bmax} Observée (m_{b3})			Energie ($\times 10^{17}$ ergs)		
	T_O	T	T_E	T_O	T	T_E	T_O	T	T_E
JANVIER	9	25	16	5,3	5,3	5	100,245	112,092	11,847
FEVRIER	19	25	6	5,2	5,7	5,7	26,8872	429,205	402,318
MARS	13	21	8	5,8	5,8	5,1	1087,66	1100,35	12,6959
AVRIL	16	27	11	5,2	5,1	4,8	40,5885	46,6704	6,08184
MAI	15	25	10	4,7	4,7	4,7	2,24418	4,6164	2,37222
JUIN	19	31	12	5,4	5,4	4,6	68,3606	70,2425	1,88183
JUILLET	26	47	21	5,5	5,5	5	139,322	154,165	14,8432
AOUT	14	27	13	4,7	5,2	5,2	3,32491	25,1853	21,8604
SEPTEMBRE	20	40	20	6,5	6,5	5,9	25150,6	26387,3	1236,69
OCTOBRE	17	34	17	5,2	6,7	6,7	24,8768	103764	103739
NOVEMBRE	33	45	12	5,4	5,4	4,9	117,573	127,596	10,0235
DECEMBRE	33	43	10	6,4	6,4	4,9	14951,9	14957	5,10647

Tableau 2.b : Extrait des résultats des paramètres temporels calculés pour sous zones de la zone Tanganyika

Année	Nombre de séismes (1954-2010)			Magnitude maximale (M_{bmax}) Observée			Energie ($\times 10^{17}$ ergs)		
	T_O	T	T_E	T_O	T	T_E	T_O	T	T_E
1954	2	2	0	5,5	5,5	0	100,025	100,25	0
1955	3	4	1	4,6	4,6	4,3	0,867308	0,999134	0,131826
1956	6	8	2	4,6	4,6	4,5	1,24115	1,66438	0,423226
1957	7	7	0	4,7	4,7	0	1,73778	1,73778	0
1958	6	9	3	4,4	4,7	4,7	0,53066	1,8339	1,30324
1959	2	4	2	4,2	4,3	4,3	0,100977	0,364628	0,263651
1960	27	29	2	6,5	6,5	4,1	25133,5	25133,6	0,087303
1961	13	17	4	4,7	4,7	4,6	1,91547	3,12492	1,20945
1962	10	15	5	4,8	4,8	4,2	2,50465	2,73658	0,231931
1963	8	13	5	4,6	4,6	4,6	1,41626	2,2271	0,810839
1964	4	12	8	5,7	5,7	4,4	302,96	30,3578	0,617963
1965	3	6	3	4,5	4,5	4,2	0,466878	0,630039	0,163161
1966	5	10	5	4,6	4,6	4,2	0,861578	1,10718	0,245605
1967	5	8	3	4,2	4,9	4,9	0,296344	4,64407	4,34773
1968	7	14	7	4,2	4,3	4,3	0,328049	0,837305	0,509256
1969	7	19	12	4,3	4,7	4,7	0,559995	3,80595	3,24596
1970	1	7	6	4	4,4	4,4	0,0251189	0,630279	0,60516
1971	0	0	0	0	0	0	0	0	0
1972	0	1	1	0	4,6	4,6	0	0,691831	0,691831
1973	1	6	5	4,2	4,7	4,7	0,0758578	2,14311	2,06725
1974	2	2	0	4,6	4,6	0	0,767689	0,767689	0
1975	1	4	3	4,4	5,1	5,1	0,229087	12,24398	12,2107
1976	1	3	2	4,2	5,2	5,2	0,0758578	21,2198	21,1439
1977	2	4	2	5,1	5,1	4,8	12,167	14,3322	2,16515
1978	1	1	0	5,3	5,3	0	33,1131	33,1131	0
1979	4	4	0	5,2	5,2	0	25,0038	25,0038	0
1980	1	3	2	3,8	4,4	4,4	0,0083176	0,281056	0,272738
1981	3	4	1	4,7	4,7	4,6	1,28957	1,9814	0,691831
1982	3	6	3	4,1	4,1	4	0,0664236	0,0998601	0,033437
1983	1	2	1	3,7	3,8	3,8	0,0047863	0,0131039	0,008318
1984	2	5	3	4,7	4,7	4,6	1,24592	1,96287	0,71695
1985	3	8	5	5,1	5,7	5,7	11,2697	413,519	402,249
1986	6	9	3	5,4	5,4	4,8	70,6049	73,1682	2,56326

Les résultats du tableau 2 ci-dessus sont représentés de la manière suivante sous forme de courbes.

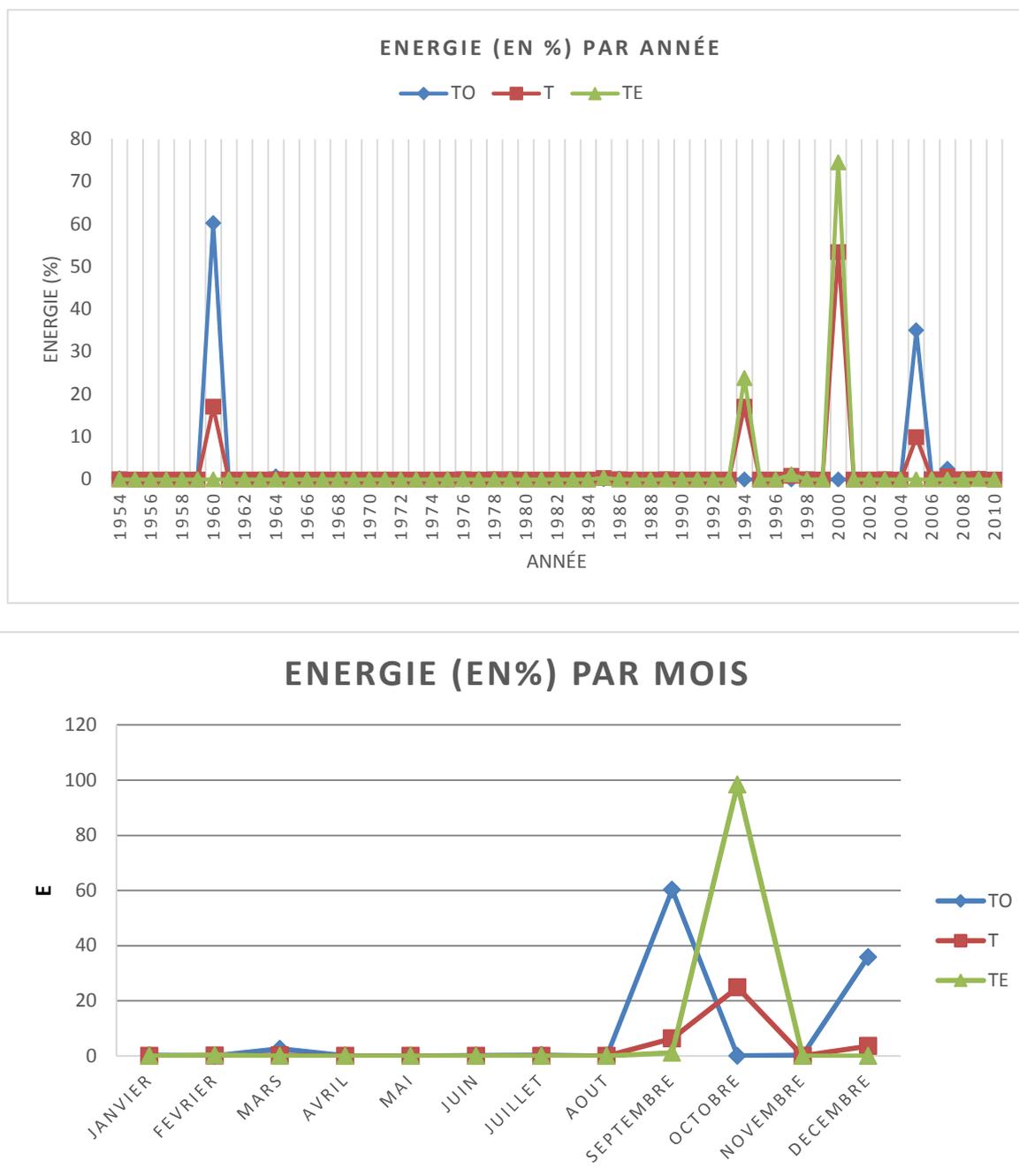


Fig.6: Courbes relatives au Tableau 2: en haut et en bas, respectivement, l'évolution de l'énergie en fonction de l'année et l'évolution de l'énergie cumulée en fonction du mois pour les sous zones du lac Tanganyika

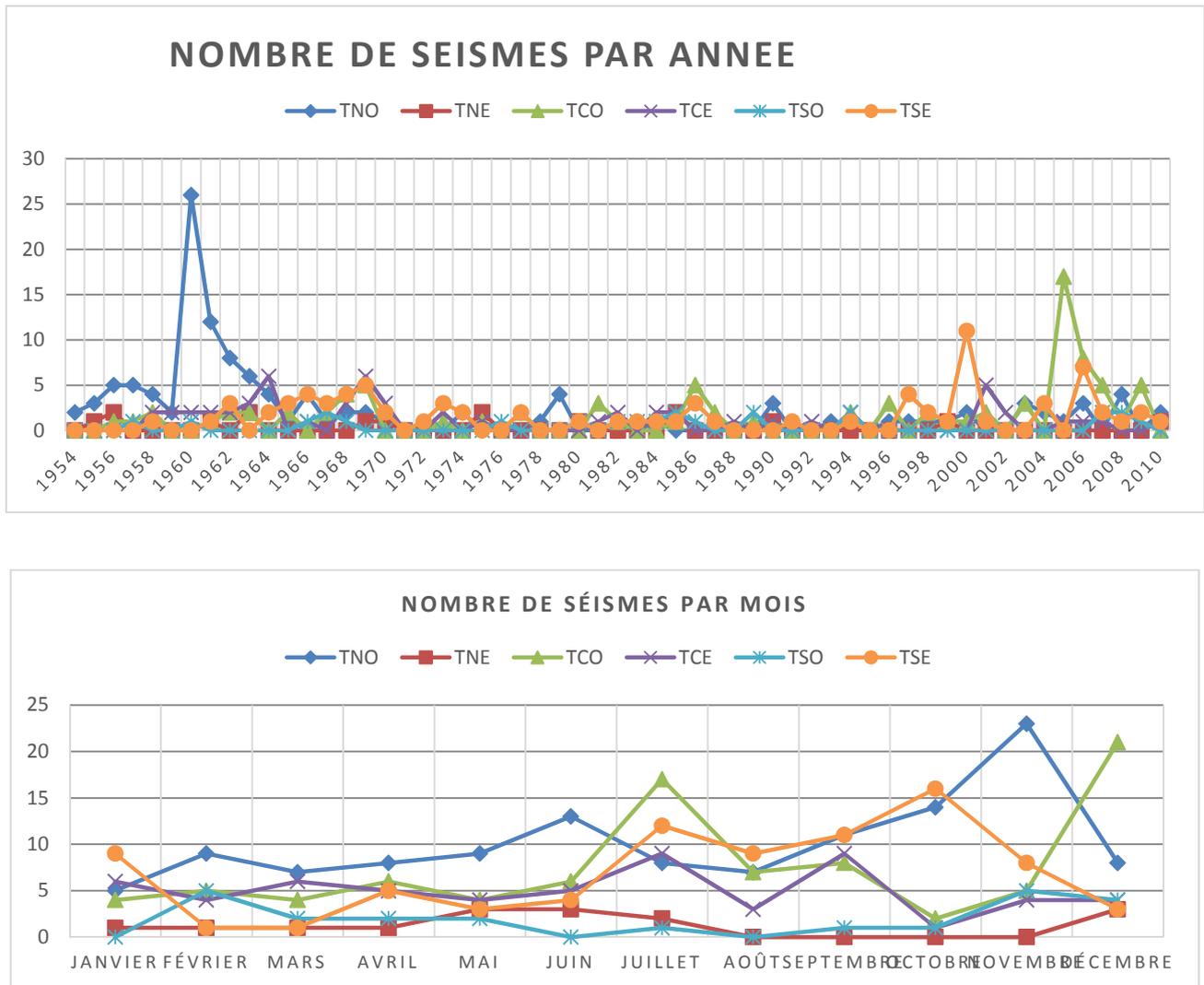


Fig.7 : Courbes relatives au Tableau 2: en haut et en bas, respectivement, l'évolution du nombre de séismes en fonction de l'année et en fonction du mois pour les sous zones du lac Tanganyika

3.2 ZONAGE SISMIQUE

En exploitant les résultats des différents paramètres calculés, nous parvenons à établir la carte de zonage sismique en attribuant le niveau de zonage sismique à chaque sous zone suivant les caractéristiques ou principes ci-dessous :

- Le niveau de zonage I est caractérisé par les séismes de magnitude $4 \leq m_b \leq 4,9$. Elle contient les zones qui sont peintes en vert.
- La zone II comprend tous les séismes de magnitude $5 \leq m_b \leq 5,9$. Elle est représentée par la couleur bleu avec toutes ses nuances.
- La zone III contient les événements de magnitude $6 \leq m_b \leq 6,9$. Ces zones sont colorées en orange, violet, jaune ou rouge.
- La zone IV, elle comprend tous les événements de magnitude $7 \leq m_b \leq 7,9$. Elle est peinte en rouge foncé.

Deux ou plusieurs séismes peuvent avoir un même niveau de zonage, mais différer sur d'autres aspects ou paramètres calculés.

D'où l'importance d'adjoindre d'autres paramètres distinctifs à chaque niveau de zonage ; une sorte de structure (hyper) fine ou de dégénérescence. Ainsi, par exemple si on écrit le niveau $X_{123(4)}$, ce ci signifie :

X est le niveau de zonage (I, II, III ou IV) décrits ci-dessus.

Les indices traduisent ce qui suit :

- 1 est liée à l'énergie libérée
- 2 est liée à l'activité sismique annuelle
- 3 est liée à l'activité sismique mensuelle
- (4) au cas où deux ou plusieurs zones sont identiques, on peut enfin les distinguer comme suit en fonction de l'indice (4) qui est lié à la fréquence des séismes de magnitude $5 \leq m_b \leq 5,9$ pour les zones de magnitude maximale observé comprise entre 6 et 6,9 et la fréquence de séismes de magnitude $6 \leq m_b \leq 6,9$ pour les séismes de magnitude $m_b \geq 7$

D'une façon générale, ces indices ne peuvent prendre qu'une seule valeur a ou b pour les indices 1,2 ou 3.

a correspond à une valeur de paramètre $< 50 \%$

b correspond à une valeur de paramètre $\geq 50 \%$

quand à l'indice (4), permettant de distinguer deux sous zones identiques, $a < b$ en fonction de la fréquence des séismes de magnitude $5 \leq m_b \leq 5,9$.

Par exemple : la zone T_{NO} et la zone T_{CO} (cfr Tableau 3) ont le même niveau de zonage III_{abb} c'est-à-dire que : $III=6 \leq m_b \leq 6,9$.

$a =$ l'énergie libérée est inférieure à 100% de l'énergie libérée partout la zone

Tanganyika subdivisée en 6 sous zones.

$b =$ l'activité sismique est $>$ à 50 %

Toutefois, la zone T_{CO} connaît une fréquence de séisme de $5 \leq m_b \leq 5,9$ supérieure (22,6 %) à celle de T_{NO} (7 %) d'où $III_{abb(b)}$ pour T_{CO} et $III_{abb(a)}$ pour T_{NO} .

A titre illustratif, nous présentons ci-dessous le tableau synoptique de la sismicité du lac Tanganyika

tableau 3: tableau synthétique des paramètres sismiques de la zone du lac tanganyika

ZONES	DENOMINATION	MAGNITUDE MAXIMALE OBSERVEE ET MAGNITUDE MAXIMALE CALCULEE		NOMBRE DE SEISMES ET MAGNITUDE		ENERGIE LIBEREE	ACTIVITE SISMIQUE		CLASSE (MAGNITUDE)						CONTRIBUTION		NIVEAU DE ZONAGE
	PARAMETRES CALCULES PAR ZONE								I: $4 \leq m_{bo} \leq 4,9$		II: $5 \leq m_{bo} \leq 5,9$		III: $6 \leq m_{bo} \leq 6,9$		Nombre de séismes	Fréq. de Seismes	
		SYMBOLES DES PARAMETRES CALCULES	m_{bo}	m_{bc}	a	b	E_T (en %)	Mensuelle	Annuelle	N	T	N	T	N			T
										Taux		Taux		Taux		N_T (%)	f
T	Zone du Lac Tanganyika	6,7	6,9110265	5,8101	0,8407	100%	100%	97%	137	0,42	40	1,42	5	11,4	100%	7	IIIbbb
									76%		22%		2%				
T _O	Partie Ouest de T	6,5	6,5309	5,8824	0,9007	28,34%	100%	88%	180	0,32	31	1,8	2	28,5	60%	4,2	IIIabb
									84,50%		14,6		0,9				
T _E	Partie Est de la zone T	6,7	6,669	4,9571	0,7433	71,66%	100%	81%	129	0,44	9	6,3	3	19	40%	2,8	IIIbbb
									91,50%		6,40%		2,10%				
T _{NO}	Partie Nord-Ouest de T	6,5	6,1107	5,6322	0,9217	17,64%	100%	63,20%	110	0,52	8	7,1	1	57	31,28%	2,2	IIIabb
									92%		7%		1%				
T _{NE}	Partie Nord-Est de T	5	4,9262	6,8055	1,3815	0,01%	67%	21,10%	14	4,1	1	57	0	0	4,10%	0,3	IIaab(a)
									93,30%		6,70%		0%				
T _{CO}	Partie Centre-Ouest de T	6,4	6,2954	5,2623	0,8359	10,86%	100%	58%	64	0,9	19	3	1	57	22,82%	1,6	IIIabb(b)
									76,20%		22,60%		1,20%				
T _{CE}	Partie Centre-Est de T	5,7	5,616	5,6969	1,0144	0,29%	100%	49,10%	49	1,2	3	19	0	0	14,87%	1,04	IIaab(c)
									94,20%		5,80%		0%				
T _{SO}	Partie Sud-Ouest de T	5,2	5,8795	3,854	0,6555	0,04%	83%	30%	14	4,1	4	14,3	0	0	5,90%	0,4	IIaab(b)
									77,80%		22,20%		0%				
T _{SE}	Partie Sud-Est de T	6,7	6,7003	4,2674	0,6369	71,30%	100%	57%	66	0,9	5	11,4	3	19	21,03%	1,5	IIIbbb
									89,00%		6,80%		4,20%				

De cette nomenclature ou légende, nous obtenons la carte de zonage sismique suivante :

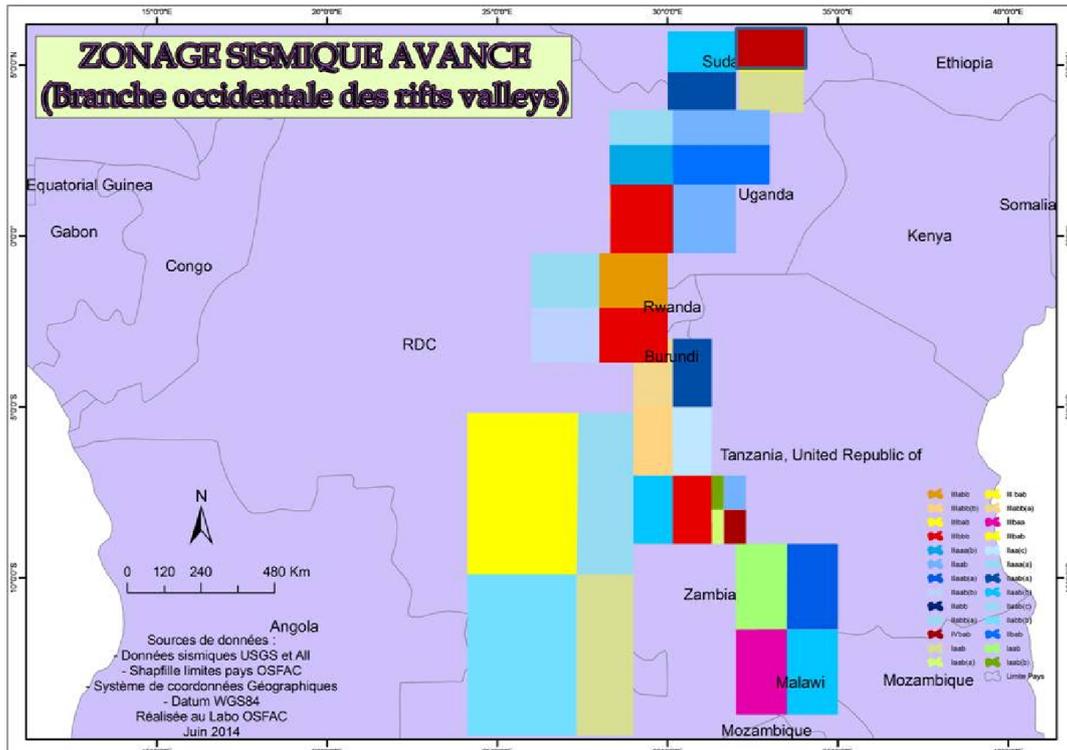


Fig.7 : Carte de zonage sismique de la branche occidentale du rift Valleys

Tableau 4. Légende des niveaux de zonage et code de couleur associé pour la Fig.7, 8,9

Niveau de zonage codé	Niveau de zonage	couleur
1	I _{aab} (a)	Vert clair
2	I _{aab} (b)	Vert foncé
3	II _{aaa} (a)	Bleu - w
4	II _{aaa} (b)	Bleu - x
5	II _{aab} (a)	Bleu - y
6	II _{aab} (b)	Bleu - z
7	II _{aab} (c)	Bleu clair
8	II _{abb}	bleu
9	II _{bab}	Bleu foncé
10	III _{abb} (a)	orange
11	III _{abb} (b)	orangé
12	III _{baa}	violet
13	III _{bab}	jaune
14	III _{bbb}	rouge
15	IV _{bab} (a)	Rouge foncé
16	IV _{bab} (b)	Rouge sang

Avec I < II < III < IV (relatif à la magnitude maximale observée) et a < b (relatif à l'activité sismique annuelle ou mensuelle)

Cette même carte peut se traduire sous forme de graphique, où l'axe des abscisses reprend les zones partant du nord vers le sud, alors que l'axe des ordonnées reprend le niveau de zonage (codé suivant le Tableau 4) associé à chaque zone.

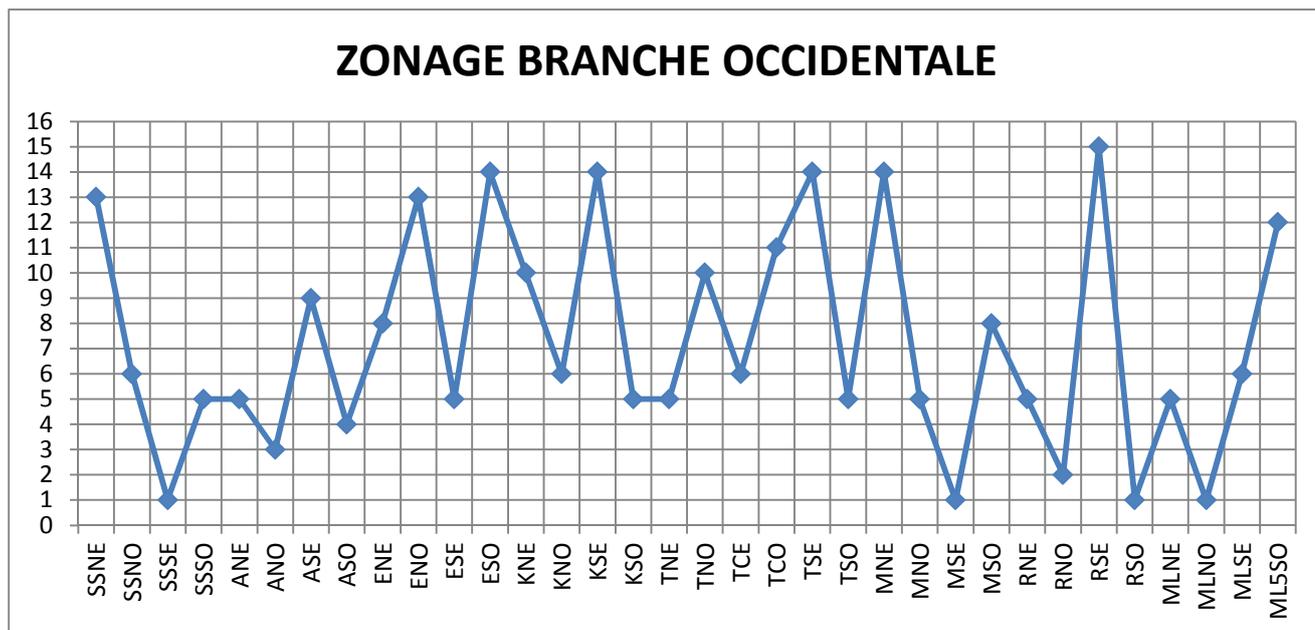


Fig.8 : Evolution du niveau de zonage du nord au sud pour la branche occidentale

De même, au lieu du niveau de zonage codé en ordonnée, nous remplaçons par la magnitude maximale observée pour chaque sous zone en abscisse,

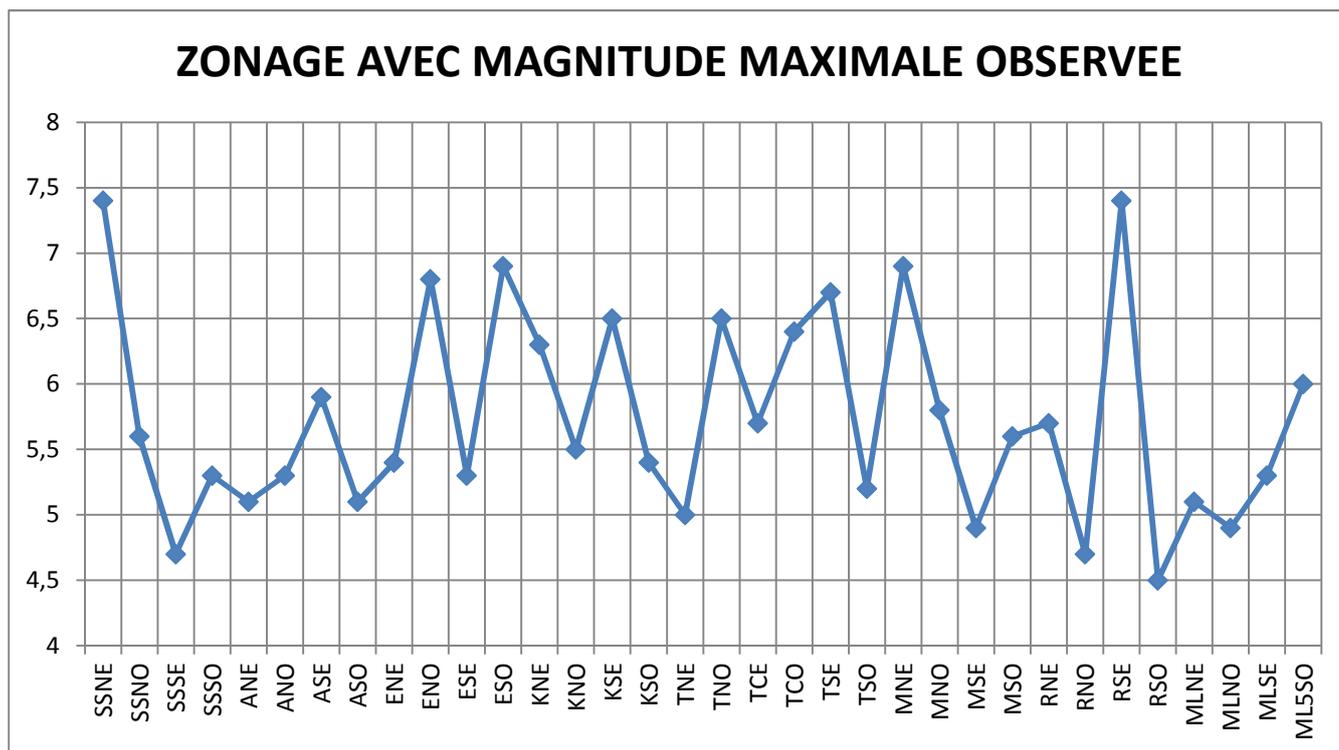


Fig.9 : Evolution de la magnitude maximale observée du nord au sud pour la branche occidentale

La comparaison des différentes zones à partir des différents tableaux et figures ci-dessus en fonction de la b – value et du niveau de zonage débouche sur un regroupement des sous zones tel exprimé par le tableau suivant :

Tableau 5 : b – value pour chaque sous zone

B-VALUE > 1	ZONES	A _{NO}	E _{NE}	K _{NO}	K _{NE}	T _{NE}	T _{CE}	R _{SO}	R _{NO}	ML _{NO}	ML _{SE}	ML _{NE}	
	VALEURS	5,3	1,0059	1,2837	1,0109	1,3815	1,0144	1,5	1,643	1,313	1,1667	1,1273	
B VALUE < 1	ZONES	SS _{NE}	SS _{NO}	SS _{SE}	SS _{SO}	A _{NE}	A _{SE}	A _{SO}	E _{NO}	E _{SE}	E _{SO}	K _{SE}	
	VALEUR	0,5321	0,62	0,89	0,68	0,7728	0,8592	0,6114	0,676	0,7398	0,649	0,7112	
	ZONES	K _{SO}	T _{NO}	T _{CO}	T _{SE}	T _{SO}	M _{NE}	M _{NO}	M _{SE}	M _{SO}	R _{NE}	R _{SE}	ML _{SO}
	VALEURS	0,7958	0,9217	0,8359	0,6369	0,6555	0,6481	0,8786	0,78	0,8654	0,6875	0,391	0,44

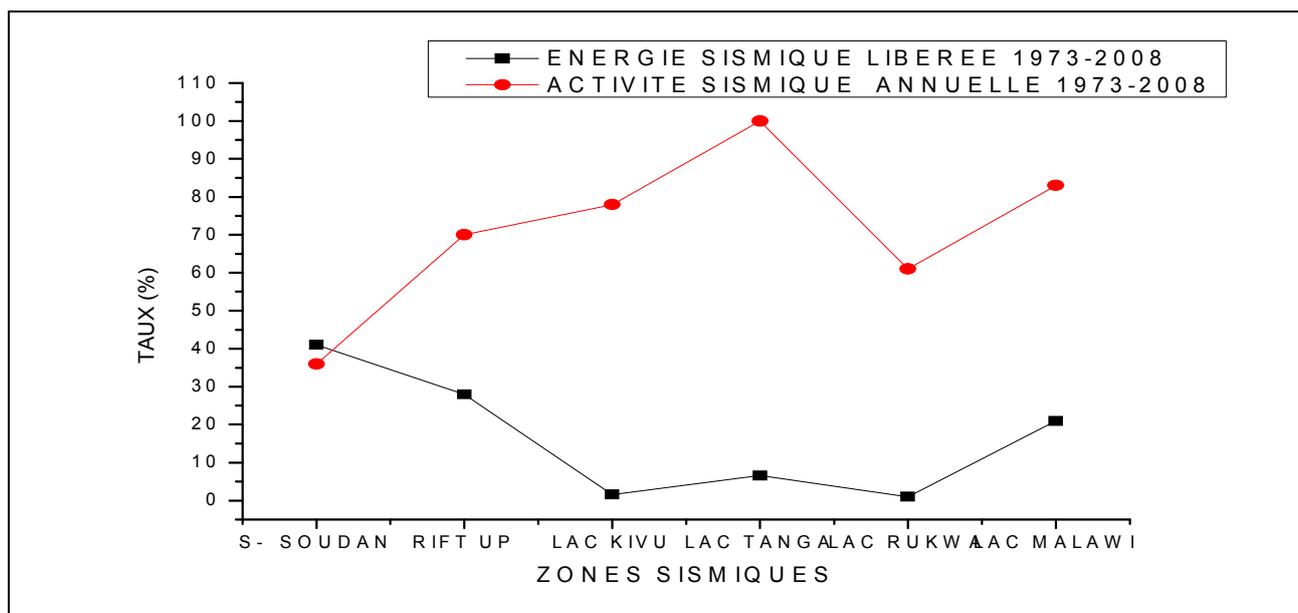


Fig.10: Courbes comparatives entre l'énergie sismique libérée et l'activité sismique annuelle pour certaines zones (en abscisse) de la branche occidentale, de 1973 à 2010

Des résultats précédents, il s'avère que :

- La plus grande magnitude enregistrée vaut 7,4 au Sud – Soudan (SS_{NE}) et au lac Rukwa (R_{SE}), avec une b – value presque égale, mais l'énergie libérée au Sud – Soudan est supérieure à celle libérée au lac Rukwa. Cela est dû à l'enregistrement de plusieurs séismes de magnitude égale à 6.
- L'activité sismique (annuelle et mensuelle, b – value) est élevée dans le lac Kivu et le lac Tanganyika (Fig.10)
- La Fig.10 montre que l'activité sismique est faible dans les zones ayant pourtant libéré beaucoup d'énergie (Sud – Soudan, lac Rukwa et rift de l'Upemba (zone mixte : M_{NO} et M_{SE})).
- Bien que l'activité sismique soit élevée dans le lac Tanganyika et Kivu, néanmoins elle n'est pas conforme :
 - Elle est d'abord concentrée dans la partie extrême Sud – Est, puis le Nord et Centre Ouest du lac Tanganyika.
 - Quand au lac Kivu, elle est concentrée dans sa partie Sud – Est et faible dans sa partie Ouest en générale.
- Quand à la zone Mixte, l'activité sismique est élevée au Nord – Ouest et au Sud – Est.
- Pour le lac Malawi, l'activité sismique est élevée au Sud 6 Ouest et faible au Nord – Ouest.
- Pour le lac Rukwa, l'activité est élevée au Sud – Est et faible à l'Ouest.
- Pour le lac Albert, l'activité sismique est élevée au Sud – Est et faible à l'Ouest.
- Pour le lac Edouard, l'activité sismique est élevée au Sud – Ouest et faible au Sud – Est.

4 CONCLUSION GENERALE

L'étude de la structure de la branche occidentale des rifts Valleys faisant partie intégrante du système des rifts Est – Africain débouche sur l'établissement de la carte de zonage dite avancée de laquelle ressortent, d'une façon générale, les aspects suivants :

- L'activité sismique est intense tout au long (ou dans) les zones de fractures ;
- Le zonage sismique laisse entrevoir la possibilité d'identifier l'orientation des failles dans une zone subdivisée en quatre sous zones au moins,
- Le zonage sismique montre la sismicité de la branche occidentale se concentre en 3 endroits principaux :
 - au Nord, dans la zone Sud – Soudan ;
 - au centre, dans l'axe lac Kivu - lac Tanganyika – lac Rukwa ;
 - au sud : au lac Malawi avec une forte ressemblance entre le lac Rukwa et Malawi.
- L'activité sismique n'est pas toujours identique pour les sous- zones d'une même zone.
- Bien que leur énergie libérée soit relativement faible, néanmoins, le lac Kivu et Tanganyika présentent une activité sismique plus intense que d'autres zones, indicatrice d'une fracturation persistante de la structure peu être également d'une minéralogie assez particulière.
- Le zonage sismique montre enfin que l'activité sismique de la branche occidentale est faible dans les zones interbassins qui souvent sont le siège d'une activité volcanique intense.
- Aux grands séismes correspondent une fréquence élevée ou une activité sismique élevée.
- L'étude de la sismicité basée uniquement sur les magnitudes observées ne suffit pas à elle seule pour la caractérisation de la sismicité d'une zone.
- La subdivision de chaque zone en sous zones a révélée la diversité de leur activité sismique (Mukange et Zana, 2012).

REFERENCES

- [1] Aki K. and G. Richards.1980.*Quantitative seismology. Theory and methods*.vol1.U.S.A: Ferman W.H. and Company.
- [2] Borden J-P.1988.*Biologie-Géologie*. Première S. Paris: Bordas.
- [3] Bormann P, 2009, New Manuel of seismological Observatory Practice, volume 1, GeoforschungsZentrum Postdam, Berlin
- [4] David P; La géophysique du système du Rift d'Afrique de l'Est, Earth and Space Sciences ;
- [5] Debelmas J, Basile C et Macle G, 2008, les grandes structures géologiques, 5^{ème} édition, Dunod, Paris ;
- [6] Doser I. Diane and B. Robert Smith.1982.Seismic Moment rates in the Utah region. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 73(3), pp 525-547.
- [7] Gacôgre G. et G. Frugier .1990. *Probabilités et statistiques, cours de maths*. Tome4. Paris : Eyrolles.
- [8] Grais B..1992. *Méthodes statistiques*.3^è édition. Paris : Dunod.
- [9] Hamagushi H; volcanoes Nyiragongo and Nyamuragira: geophysical aspects, Tôhoku University Sendai 1983;
- [10] Lay T. et T. Wallace.1995. *Modern Global seismology*. New-York: Academic Press
- [11] Mavonga T..2009. *Seismic hazard assessment and volcanogenic seismicity for the Democratic Republic of Congo and surrounding areas, western rift valley of Africa*. Thèse de doctorat: University of the Witwatersrand (Johannesburg), Faculty of Sciences.
- [12] Mukange, 2011, caractérisation de la sismicité de la République Démocratique du Congo, mémoire de DEA, Université de Kinshasa,
- [13] Ramananda Charrabarti, Asish R. Basu, Alba P. Santa, Dario Tedesco, Orlando Vaselli ; Isotopic and geochemical evidence for a eterogenous mantle plume origin of Virunga volcanics, Western rift, East Rift System ; vol.259, 2009.
- [14] Vuyst A ; la nouvelle conception de la dérive des continents, ciel et terre 1969 ;
- [15] Wafula M D, Activité volcano-sismique dans la région volcanique des Virunga, Rift Ouest-Africain et son implication dans la prédiction des éruptions volcaniques, thèse de doctorat : Université de Kinshasa 2011.
- [16] William L, fundamentals of geophysics, Cambridge University Press 2007;
- [17] Zana N ; M.Kamba ; S. Katsongo and Th. Jansen; Recent seismic activity of Kivu province; western Rift valley of Africa, Elsevier Science Publishers B.V, Amsterdam 1988;
- [18] Zana N, Cours de géophysique générale, Université de Kinshasa 2014;
- [19] <http://www.usgs.gov>, le 3 /2/ 2010