

## Etude Differentielle Des Sites Geothermiques De Kankule A Katana Au Sud-Kivu

MULENDA MBUTO Adelin<sup>1</sup>, CIMBELA KABONGO Joseph<sup>1</sup> et KABASELE  
YENGA-YENGA Albert<sup>1</sup>

1. Université Pédagogique Nationale/Kinshasa, P.O.Box 8815, Kinshasa /Binza, D.R. Congo.

**Résumé :** Les besoins en énergies au monde se sont accrus avec la croissance de la population mondiale. Et cela depuis la révolution industrielle du 18<sup>ème</sup> siècle, et avec comme conséquence l'augmentation de l'effet de serre. Pour ralentir tant soit peu les changements climatiques d'origine anthropique, les spécialistes du Groupe International d'Experts sur le Climat (GIEC en sigle) ont alors depuis plus d'une décennie recommandé l'exploitation des énergies renouvelables. Au Sud-Kivu, aux sites où il y a des thermes, on peut consommer propre en produisant et exploitant de l'électricité géothermique. La population de Kankule et environs, à Katana au Sud-Kivu, peut alors bénéficier de cette manne qui s'élèverait à de Mégawatts de puissance électrique produite. Ceci en vue de réduire la déforestation et ses conséquences sur le climat.

**Mots clés :** Géothermie, géomagnétique, Gradient thermique et Géotherme.

Date of Submission: 18-05-2020

Date of Acceptance: 03-06-2020

### I. Revue De La Litterature

Le chercheur Albert Kabasele, dans son ouvrage de 2019 ainsi que sa thèse de 2009, démontre que la déforestation implique le changement climatique. Et au stade actuel, en RDCongo et dans Katana en particulier cela entraîne une augmentation de température. Le chercheur suggère la reforestation et l'exploitation des énergies renouvelables pour ralentir le changement climatique provoqué par l'homme. La géothermie est une parmi les énergies renouvelables connues actuellement. Elle pourrait être exploitée dans Katana au Sud-Kivu. Les études d'Adelin MULENDA [2013] ou de Bagalwa et al., [2016] montrent qu'il y a des sources d'eaux ; aussi froides que chaudes, dans Kankule. Et ces eaux chaudes peuvent être classifiées selon leur température de par les études déjà réalisées ailleurs dans le monde, comme le signale Lindal pour la France [Wikipédia, 2020]. En partant de l'étude des propriétés de certains paramètres physiques ou chimiques, nous pouvons arriver à déterminer les exploitations susceptibles d'être réalisées sur un site donné. Parmi ces propriétés, nous avons par exemple : les températures des eaux thermales, du sol ou de l'air avoisinant le site ; les champs géomagnétiques du site, ... Les travaux menés en Soultz-Sous-Forêts en Alsace [Wikipédia, 2020], ont permis d'observer que l'eau chaude puisée à 203°C, à une profondeur de 5,01 km ; peut produire une puissance de 13MW dont 2,1 MW de puissance électrique brute. Une exploitation de géothermie nécessite la connaissance de la gravimétrie et de la magnétométrie du site [Wikipédia, 2020] . La gravimétrie pour détecter des îlots de chaleur, et la magnétométrie pour la conductibilité du sol du site. Une exploitation de la géothermie à Kankule nécessite donc la connaissance du gradient de température de chaque site et du champ géomagnétique du lieu. Une telle association facilitera la différenciation de site. Et permettra aussi de projeter la puissance électrique susceptible d'être produite à Kankule, avec nos 14 sites d'étude.

L'équation de transfert de chaleur de Fourier à une dimension est donnée par la relation :  $\frac{\partial^2 T}{\partial z^2} - \frac{1}{\alpha} \frac{\partial T}{\partial t} = 0$  (1.1) [Adelin, 2013].

La solution de cette équation, appelée courbe intégrale ou géotherme, est donnée par :

$$T(z,t) = \bar{T}_0 + \bar{A}_0 \cdot e^{-\frac{z}{d}} \sin\left(\frac{2\pi(t-t_0)}{365} - \frac{z}{d} + \frac{3\pi}{4}\right) \quad (1.2). \text{ Avec}$$

$\bar{T}_0$  : La température moyenne annuelle du sol

$\bar{A}_0$  : L'amplitude thermique moyenne annuelle

$t_0$  : le « time – lag » où un jour arbitraire du mois avec la température la plus petite.

Sachant que [Adelin, 2013],

$$\sigma = \sqrt{2\alpha t}$$

où  $\sigma$  est la « variance » des données,  $\alpha$  est la diffusivité thermique du sol et  $t$  est le temps mesuré pendant la même période que  $\omega$ .

Par suite le coefficient d'amortissement  $d$  est obtenu par :

$$d = \sqrt{\frac{2\alpha}{\omega}} = \frac{\sigma}{\sqrt{\omega t}} = \frac{\sigma}{\sqrt{2\pi}}$$

Exploitant (1.2), on trouve le gradient de température  $\frac{\partial T}{\partial z} = \text{grad}(z, t)$  donné par la relation :

$$\text{grad}(z, t) = -\frac{A_0}{d} e^{-\frac{z}{d}} \cos\left(\frac{2\pi(t-t_0)}{365} - \frac{z}{d} + \frac{\pi}{2}\right) \quad (1.3)$$

A l'aide de (1.2) et (1.3), on obtiendra les températures et gradients maximums pour chaque site de Kankule. Le gradient de température par site permet de préciser quelle exploitation économique on peut réaliser sur un terrain donné. Suivant qu'on peut travailler en géothermie superficielle ou profonde. Un travail qui avait permis à [Ecorems.a, 2011] de trouver ces applications géothermiques :

- $< 30$  °C et  $< 500$ m: géothermie superficielle. Ceci reprend les températures (enthalpie) très basses.
- entre  $25-30$ °C et  $150$  °C et  $> 500$ m: géothermie profonde. Ceci reprend les températures (enthalpie) basses et moyennes.

Cette étude précise que si le réservoir géothermique atteint une température supérieure à  $150$  °C, et est rencontré à de faibles profondeurs, la ressource doit donc se trouver dans une région où le gradient géothermique est normal ( $\sim 30$  °C/km) ou au-delà de la normale. Ces auteurs disent que pour la production de l'électricité, la température atteinte devra-être au moins  $90$ °C, selon les études récentes faites aux Etats-Unis. La classification de [Ecorems.a, 2011] rencontre celle suggérée par Lindal pour la France [Wikipédia, 2020].

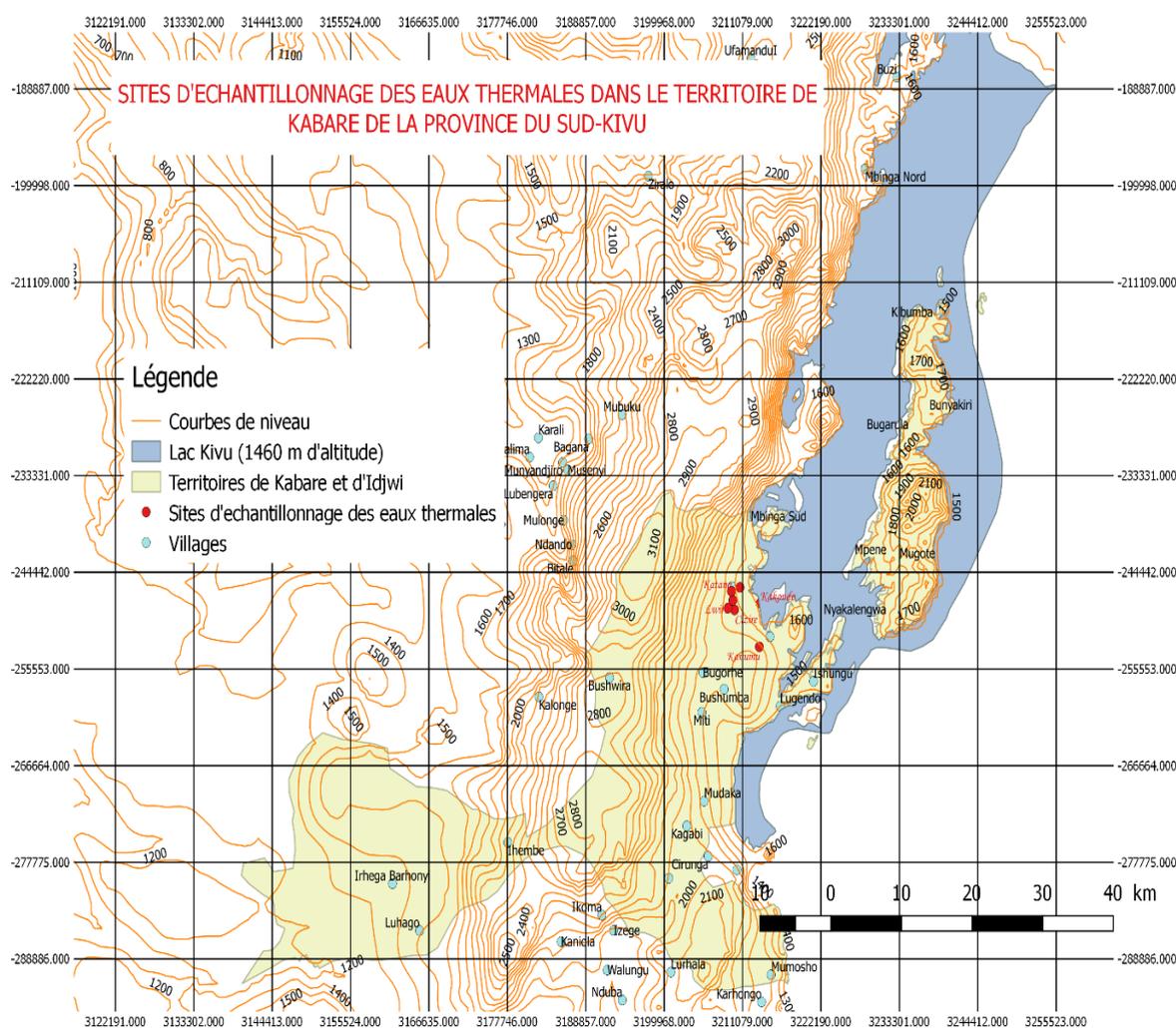
## II. Methodologies

### 2.1. Description du milieu d'étude

#### 2.1.1. Localisation géographique du milieu

Notre domaine d'étude est la localité de Kankule qui se situe entre les latitudes Sud  $-2,241666^\circ$  et  $-2,249166^\circ$ , longitude Est  $28,834833^\circ$  et  $28,8415^\circ$  et altitude variant entre  $1565,42$  m et  $1586,44$  m.

C'est une partie de la collectivité de Kabare dans la province du Sud – Kivu en République démocratique du Congo. Kankule se situe entre les rivières Bidagarha et Lwiro qui ont leurs sources dans la forêt de Kahuzi se trouvant dans le parc national de Kahuzi Biega soit à approximativement  $7$  km de notre milieu d'étude [Adelin M, 2013] et [Bagalwa et alii, 2016]. Une image de ce site est donnée par la figure 1 ci-dessous :



**Figure 1** : La Géolocalisation du site des eaux thermales de Kankule, dans Katana au Sud-Kivu

### 2.1.2. Climat

Kankule se trouve sur une partie de la chaîne du Mont Mitumba qui s'étale sur une large partie à l'Est de la République démocratique du Congo. Le climat qui y règne est influencé par ce positionnement, aussi sa localisation entre le lac Kivu et le parc national de Kahuzi Biega. On a un climat tropical humide, tempéré par altitude avec des températures qui oscillent entre 18°C et 22°C et une pluviométrie avoisinant 1590 mm [PNUD/UNOPS, 1998].

### 2.1.3. Faune et végétation

La faune est riche en invertébrés et en oiseaux qui abondent dans le milieu. La flore par endroit non exploitée reste une végétation alpine, des savanes et des bambous, ... en extension du prolongement de celle du parc national de Kahuzi -Biega. Sur les terrains exploités, on trouve des champs cultivés avec prédominance des bananeraies et des caféiers, ...[PNUD/UNOPS, 1998], des haricots, des maniocs, des sorghos, des quinquinas, des théiers, ...

### 2.1.4. Sol et géologie

Situé à peu près à 7 km des volcans endormis de Kahuzi et Tshibati, la roche mère de Kankule repose sur les basaltes résultant d'un volcanisme ancien et repose aussi sur des schistes [PNUD/UNOPS, 1998] & [De la carte géologique de la région du Sud – Kivu, 1939]. Dans le milieu abonde de ferrisol (calcite et dolomite de la famille des carbonates) et une réserve considérable des travertins, évalués à 3 millions de tonnes dans tout Katana, matières premières exploités à la cimenterie de Katana pour la production du ciment [PNUD/UNOPS, 1998] avec l'argile et tourbes aussi présentes en quantité non encore évaluées. On trouve aussi des sources d'eaux froides et des sources d'eaux thermales dont les dernières ont fortement contribué à la formation des travertins dans le milieu [PNUD/UNOPS, 1998] & [De la carte géologique de la région du Sud – Kivu, 1939].

On trouve également sur le lieu des réserves des silices, importante matières premières pour la verrerie. On est ici en présence d'un sol important pour ses propriétés physico-chimiques

### 2.1.5. Population et vie socio-économique

La population qui habite ce milieu est majoritairement constituée de Bashi qui vivent surtout et essentiellement de l'agriculture de subsistance [PNUD/UNOPS, 1998]. La forte densité dans tout Katana avoisine 300 habitants au km<sup>2</sup> et l'insécurité grandissante autour de Kankule a vu cette densité croître fortement année par année avec comme conséquence une forte demande des terres habitables et cultivables. Il n'y a presque pas d'industries lourdes qui exploiteraient la main-d'œuvre présente dans le milieu pour amoindrir la misère de la population du lieu qui est incapable de satisfaire à ses besoins primaires [PNUD/UNOPS, 1998].

## 2.2. Approche Méthodologique

Notre démarche méthodologie, pour ce travail, a été la suivante :

### 2.2.1. Expérimentale

1°) De 8h à 14h, avec le thermomètre du sol, nous avons prélevés sur 14 sites, dénommés Kankule I, Kankule II, ..., et Kankule XIV :

- Les températures du sol à 15 cm de profondeur, chaque jour, en 52 semaines Pour exploiter le principe holographique à l'échelle macroscopique. Ce principe stipule que « l'information contenue en surface, n'est pas moindre que celle contenue en volume » [Recherche, 2009]. Ceci afin qu'on trouve un mécanisme de réduction du coût d'exploration de la géothermie ;
- Prélèvement des échantillons du sol de chaque site, chaque fois. Sol qui a été examiné au laboratoire de l'Office Congolais de Contrôle de Bukavu (O.C.C/ Bukavu). Cette étude nous a permis de connaître la composition minéralogique de cette terre prises à 15 cm de profondeur au plus. Cette connaissance est indispensable dans la différenciation des sites ;
- Les températures des eaux thermales, durant la même période de septembre 2010 en décembre 2014. Afin de voir si la température de ces eaux dépend du site d'étude ;
- Les échantillons des eaux de chaque site. L'analyse de ces eaux, faites au Laboratoire du Centre de Recherche en Sciences Naturelles de Lwiro (CNRS/Lwiro), nous ont permis de connaître les ions présents. Ceci en vue d'une étude du comportement géomagnétique du site correspondant à chaque eau.
- Les températures de l'air ambiant, à au plus 2m au-dessus du sol. Ceci couplé avec la température du sol, nous a permis de mieux saisir leur interdépendance avec le champ magnétique terrestre du site.

2°) Avec un GPS, de marque Garmin, nous avons prélevés, les coordonnées géographiques de chaque site pour trouver les champs géomagnétiques de chacun des sites, sur le web site de NOAA [<http://www.arl.noaa.gov/ready.geomagn> , 2018]. La connaissance du champ magnétique de chaque site, contribue à différencier les sites.

3°) Les logiciels Excel, R ou SPSS ; nous ont permis de déterminer les constantes qui sont intervenus dans le géotherme (ou solution de l'équation de Fourier) comme signalé par CER 2007 et Wu et Nofziger 1999 (ou 2003). Ceci a facilité l'analyse de distribution de gradient de température que nous avons obtenu. Aussi en passant par l'analyse Factorielle (AF) ou en composante principales (ACP), nous avons été en mesure d'établir les rapprochements ou éloignements des sites. En exploitant les dendrogrammes utilisant les différents paramètres physiques ou chimiques.

### 2.2.2. Analytique

1) Nous avons calculés les valeurs moyennes des températures pour :

- Le sol
- L'air ambiant
- Et l'eau pour chaque site.

Ceci dans le but de parvenir à la différenciation ou rapprochement de ces sites.

2) En partant de l'équation de Fourier à une dimension :  $\frac{\partial^2 T}{\partial z^2} - \frac{1}{\alpha} \frac{\partial T}{\partial t} = 0$ , nous avons trouvé :

- La courbe intégrale ou géotherme :  $T(z,t) = \bar{T}_0 + \bar{A}_0 \cdot e^{-\frac{z}{d}} \sin\left(\frac{2\pi(t-t_0)}{365} - \frac{z}{d} + \frac{3\pi}{4}\right)$
- Et le gradient donné par :  $\frac{\partial T}{\partial z} = \text{grad}(z, t) = -\sqrt{2} \frac{A_0}{d} e^{-\frac{z}{d}} \cos\left(\frac{2\pi(t-t_0)}{365} - \frac{z}{d} + \frac{\pi}{2}\right)$

Exploitant ces solutions, nous avons déterminé pour chaque site la valeur maximale de ce gradient de température. Résultat qui nous a permis de déterminer les exploitations économiques éventuelles par site. En

tenant compte de la classification donnée par [Ecorems.a, 2011] ou par Lindal pour la France [Wikipédia, 2020].

### 2.2.3. Statistiques

Exploitant les logiciels Excel, R ou SPSS nous avons pu déterminer :

- Les constantes qui sont intervenues dans les géothermes de chaque site
- Les liens entre les champs magnétiques de chaque site avec les températures du sol, eau thermale ou air ambiant pour chaque site.
- Le dendrogramme des sites. Ceci permet d'élucider les sites proches de par les propriétés physico-chimiques de leurs eaux ou sols. La profondeur d'exploitation de la géothermie de Kankule ne devrait pas dépasser la hauteur du volcan éteint de Mont Kahuzi, qui vaut 3308m. La température minimale du site ne devra pas être en-dessous de 90°C pour la production de l'électricité [Wikipédia, 2020].
- La profondeur optimale pour l'exploitation de l'électricité par géothermie à Kankule. En recourant à la méthode d'alerte précoce (SAP) [Albert Kabasele, 2017].

### 2.2.4. Comparative

En comparant ce qui se fait sur le site français d'Alsace à Soultz en France [SVT, 2019] et [Wikipédia, 2020], nous devrions arriver à préciser :

- La profondeur minimale et /ou maximale d'exploitation pour produire l'électricité à Kankule
- La quantité d'énergie qui serait produite par site
- La quantité d'énergie globale qu'on devra produire sur nos 14 sites de Kankule.

## III. Resultats Et Analyses

La réduction du champ géomagnétique terrestre B en température du sol T, donne :  $B = a T + B_0$ . Les coefficients de cette opération sont donnés dans les tableaux n°1 ci-dessous. L'hypothèse nulle  $H_0$  de cette linéarisation sous-entend qu'il y a dépendance entre les variables B et T. En écrivant 1, cela veut dire que l'hypothèse nulle est acceptée. 0 signifie que l'on accepte l'hypothèse alternative, d'indépendance des deux variables au seuil de probabilité indiqué. B étant exprimé en micron tesla et T en degré Celsius. On n'indique que le gradient thermique maximum du site, exprimé en degré Celsius par mètre. Voici alors le tableau n° 1 des résultats :

**Tableau 2** : Matrice de réduction température du sol avec champ géomagnétique plus gradient thermique maximal par site

	a	B	Ho 0,001	Ho 0,01	Ho 0,05	Grad max
Kankule I	5.196e-02	4.964e-15	1	1	1	0,09419068
Kankule II	3.888e-01	-2.561e-14	1	0	0	0,12567529
Kankule III	5.017e-01	-6.483e-14	0	0	0	0,09799187
Kankule IV	4.610e-01	-5.989e-14	0	0	0	0,1254712
Kankule V	2.117e-01	6.208e-15	1	1	1	0,13139944
Kankule VI	1.917e-03	2.475e-16	1	1	1	0,08331411
Kankule VII	2.438e-01	8.349e-15	1	1	1	0,11600811
Kankule VIII	2.049e-01	6.800e-15	1	1	1	0,1285185
Kankule IX	2.932e-01	9.414e-15	1	1	0	0,12139556
Kankule X	3.176e-01	-9.710e-15	1	1	0	0,13234238
Kankule XI	2.495e-01	-2.501e-14	1	1	1	0,136118
Kankule XII	4.278e-01	-4.870e-14	1	0	0	0,10765238
Kankule XIII	3.515e-01	2.281e-14	1	1	0	0,09507472
Kankule XIV	-1.140e-01	-1.060e-14	1	1	1	0,143408

A la vue de présentation des résultats de ce tableau, intéressons-nous à la distribution des gradients thermiques maximum sur nos 14 sites de Kankule. Nous effectuons pour cela, le test de normalité avec le logiciel R. Le gradient thermique moyen mondial étant de 0,033 °C/m [Adelin, 2013], [www.Wikipedia.fr/géothermie, consulté le 19 septembre 2020].

La figure 2 ci-dessous, illustre cela.

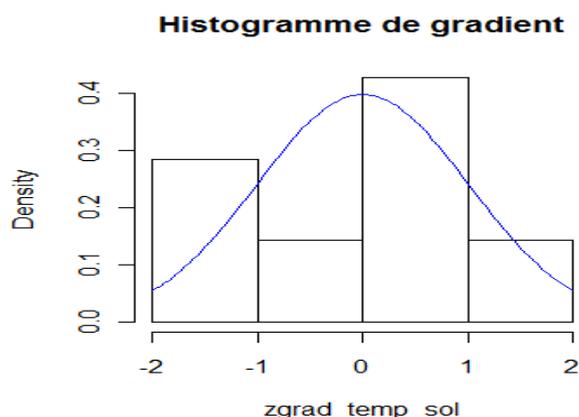


Figure 2 : Test de normalité du gradient expérimental avec la courbe de Gauss

Une simple analyse, nous montre que l’histogramme de gradient thermique n’est pas symétrique. Se demandant si le gradient thermique expérimental moyen de Kankule, qui donne  $m=0.117$  [°C/m], s’il est égale au gradient thermique moyen mondial de  $m_o= 0.033$  [°C/m] ; nous effectuons le test de comparaison des moyennes ci-dessous, en R :

`>t.test(grad_temp_sol,mu=0.033)`

One Sample t-test

```
data: grad_temp_sol
t = 17.1116, df = 13, p-value = 2.692e-10
alternative hypothesis: true mean is not equal to 0.033
95 percent confidence interval:
 0.1064298 0.1276502
sample estimates:
mean of x
0.11704
```

De ces analyses précédentes, cherchons les spécificités de chaque site de Kankule. Les résultats nous sont donnés dans tableau 3.2 ci-dessous :

Tableau 2 : Paramètres physico-chimiques par site de Kankule

	Kan kule I	Kank ule II	Kank ule III	Kank ule IV	Kank ule V	Kank ule VI	Kank ule VII	Kanku le VIII	Kan kule IX	Kank ule X	Kank ule XI	Kan kule XII	Kanku le XIII	Kanku le XIV
T_sol	30	22,7	22,5	26	36	27,5	39,5	31,9	31,3	35,9	35,2	37	38	41,5
T-air	23	21,7	21,3	22,3	23,7	23,8	23,3	23,1	23,4	24,8	25,7	27	26	27
T_eau	54	54,4	45,4	66,2	62,9	47,6	64,2	50,7	64,2	63,9	69,9	65	63	62,5
grad_Sol	0,1	0,13	0,1	0,13	0,13	0,08	0,12	0,13	0,12	0,13	0,14	0,1	0,1	0,14
Bv	-16	-16	-16	-16,2	-16	-16	-16	-16	-16	-16	-16	-16	-16	-16
Bh	29	28,8	28,8	28,8	28,8	28,8	28,8	28,8	28,8	28,8	28,8	29	29	28,8
Champ B	33	33,1	33,1	33,1	33,1	33,1	33,1	33,1	33,1	33,1	33,1	33	33	33,1
LE_hum us	92	84,2	76,4	85,9	76,4	76,8	97,1	85,7	92,1	94,1	96	81	88	94,9
Fe en %	7,2	14,2	21,2	11,7	20,5	19,9	2,42	12,4	5,97	4,89	3,81	17	11	3,83
Cr en %	0	0	0	0	0,08	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Mn en %	0,4	0,26	0,16	0,13	0,4	0,25	0,19	0,1	1,08	0,59	0,1	0,9	0,7	0,43
Ti en %	0,3	1,19	2,07	2,1	2,44	2,73	0,28	1,78	0,77	0,39	0	1,1	0,9	0,82
Zr en %	0,1	0,05	0,04	0,04	0,05	0,05	0,04	0,03	0,03	0,04	0,04	0,1	0	0,04
Re en %	0	0,01	0	0,01	0,02	0,02	0	0	0,01	0,02	0,02	0	0	0,02
Zn en %	0	0,02	0,03	0	0	0	0	0,03	0	0	0	0	0	0
Nb en %	0	0,01	0,02	0,12	0,03	0,03	0	0,02	0	0	0	0	0	0
Ni en %	0	0,03	0,05	0	0,04	0,05	0	0,04	0	0	0	0	0	0
Pb en %	0	0	0	0	0	0,01	0	0	0	0	0	0	0	0
Co en %	0	0	0	0,14	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Cl- (mg/L)	7	6,4	6,3	6,3	7,1	7	7,25	7	8	7,1	6,8	6,1	6,5	5,5

## Etude Differentielle Des Sites Geothermiques De Kankule A Katana Au Sud-Kivu

SO4-- (mg/L)	492	484	540	461	542	537	550	540	521	497	509	530	528	509
HCO3- (mg/L)	323	330	310	360	338	350	335	348	321	348	353	300	298	285
PO4--- (µmole/ L)	0,1	0,07	0,06	0,11	0,07	0,09	0,08	0,09	0,09	0,1	0,09	0,1	0,1	0,13
NH4+ (µmole/ L)	77	44,2	28,9	28,9	138	54,4	49,3	96,9	64,6	34	102	65	105	71,4
NO3- (µmole/ L)	5,1	8,5	34	32,3	18,7	18,7	45,9	11,9	17	18,7	15,3	6,8	20	51

Un tableau qui permet de voir les mêmes paramètres physiques et chimiques sur tous les sites de Kankule.

Guidé par le sens qu'à partir de 90°C, sur une source thermique on peut construire une centrale géothermique pour produire de l'électricité. Nous avons obtenu avec le Système d'Alerte Précoce (SAP) le tableau 3 ci-dessous :

**Tableau 3 : Prévion de profondeur pour des valeurs optimales de Températures fixées**

SITE	gradient Sol	TEMPERATURE		Coefficient de proportionnalité	Coefficient	PROFONDEUR DU SOL	
		MIN	MAX			MIN	MAX
KANKULE I	0,09419068	90	203	0,481	43,789	1019,21	3514,15
KANKULE II	0,12567529					763,87	2633,77
KANKULE III	0,09799187					979,67	3377,83
KANKULE IV	0,1254712					765,12	2638,06
KANKULE V	0,13139944					730,60	2519,04
KANKULE VI	0,08331411					1152,27	3972,92
KANKULE VII	0,11600811					827,53	2853,25
KANKULE VIII	0,1285185					746,97	2575,50
KANKULE IX	0,12139556					790,80	2726,62
KANKULE X	0,13234238					725,39	2501,09
KANKULE XI	0,13611762					705,27	2431,72
KANKULE XII	0,10765238					891,76	3074,71
KANKULE XIII	0,09507472					1009,73	3481,47
KANKULE XIV	0,14340807					669,42	2308,10

Le gradient thermique est en [°C/m], la température du sol en [°C] et, la profondeur en [m].

### IV. Discussion Des Resultats

1) On se demande si les 14 sites de Kankule, de notre étude sont identiques ou si ce terrain est homogène. Pour répondre à cette préoccupation, nous avons fait les analyses présentées dans les tableaux 3.1 et 3.2. Aussi le test de normalité, illustré par la figure 3.2. Si le terrain de Kankule est homogène, nous aurons presque la même proportion des paramètres physico-chimiques entre deux sites différents [BagalwaMasimango Jean-Jacques et alii, 2016]. Qu'on observe à Kankule ? :

- Tous nos sites choisis sont des terrains où il y a des eaux thermales. En ce point de vue ces sites sont donc identiques ;

- Les températures moyennes (du sol, air ou air) ne sont pas les mêmes pour deux sites différents. En effet, si nous prenons Kankule I et II, pour illustrer, nous avons :  $\frac{29,81731}{22,74038} \neq \frac{22,5596154}{21,6673077} \neq \frac{54,30962}{54,3625}$ . Ceci sous-entend que les eaux thermales ne sont pas issues de même profondeur pour deux sites différents ;

- Les eaux thermales de chaque site contiennent des ions positifs et négatifs. Comparons par exemple les proportions de ces ions entre deux sites. Illustrons pour Kankule III et IV. Nous avons :  $\frac{6,4}{6,3} \neq \frac{484,32}{539,52} \neq \frac{330}{310} \neq \frac{0,071}{0,062} \neq \frac{44,2}{28,9} \neq \frac{8,5}{34}$ . Mais comme ces ions ne sont pas dans la même proportion entre deux sites différents, alors les eaux chaudes des sites ne sont pas issues de la même profondeur, mais rencontrent la même roche mère. Autrement dit ces eaux chaudes sont influencées dans des portions différentes de la même roche des laves basiques récentes [De la carte géologique de la région du Sud – Kivu, 1939], [Musée Royal de l'Afrique Centrale, 2005].

- La régression linéaire, de la température du sol en fonction du champ géomagnétique du lieu, ne donne pas toujours les mêmes coefficients de régressions. Le champ électrique du site, est caractérisé par les

mouvements des ions, dans les eaux chaudes. En cas d'homogénéité du sous-sol de Kankule, la corrélation entre B et T serait la même partout. Ce qui n'est pas le cas.

- La figure n° 3.2, donne l'histogramme qui n'est pas symétrique. Cela veut sous-entendre que le sous-sol de Kankule n'est pas distribué de manière homogène. [Albert Kabasele, 2009], [Albert Kabasele, 2019]

- Au seuil de 0,1 %, 1 % ou 5 % ; la réduction B en T reste vérifiée toujours aux sites de Kankule I, V, VI, VII, VIII, XI et XIV. Aux autres sites parfois la linéarité pose problème. Surtout aux sites de Kankule III et IV où mathématiquement ça ne fonctionne pas. La droite de régression a toutefois été trouvée. Selon nous, la raison est qu'il y a une interaction toujours entre le champ géomagnétique du site avec les ions présents dans les eaux chaudes de ce site. Aussi faible soit-elle, cette interaction entre champ magnétique terrestre et électrique du site existe toujours.

2) Comment se comporte le gradient moyen de chaque site de Kankule par rapport au gradient thermique moyen mondial ? Le test de normalité nous montre que le gradient moyen des sites de Kankule n'est pas normal. Il est 3,5 fois supérieur au gradient thermique moyen mondial. C'est seulement les gradients thermiques de Kankule I, III, VI et XIII qui sont en dehors de l'intervalle de confiance [0.1064298 ; 0.1276502]. Mais le plus petit gradient thermique moyen de Kankule VI, reste 2,5 fois plus grand que le gradient thermique moyen mondial. Ainsi chaque site de Kankule possède un gradient thermique qui est au moins 2,5 fois plus grand que le gradient thermique moyen mondial.

3) Des discussions et analyses précédentes, nous observons que nous avons le même sous-sol à Kankule, avec de concentration différente. Et comme les eaux des sites sont alimentées en profondeur par différents îlots de chaleur, nous nous demandons alors : Quelle exploitation géothermique peut-on réaliser par site de kankule ? Pour répondre à cette question il a fallu que l'on sache si le gradient thermique de chaque site est normal. Le test de normalité effectué nous montre que le plus petit gradient thermique est de Kankule VI. Ce gradient de 0,08331411°C/m vaut 2,5 fois le gradient thermique moyen mondial de 0,033 °C/m. Pour un terrain sans anomalie thermique, le gradient thermique du site serait plus proche de celui mondial. Or pour Kankule, il n'en est pas ainsi. Nous concluons que le gradient thermique de chaque site de Kankule n'est pas normal. Et l'exploitation économique d'un site, dépend de la profondeur à laquelle il faudra descendre pour puiser de l'eau ou liquide caloripporteur. [Ecorems.a, 2011], [Géoscience ,2013] et [Wikipédia, 2020]. Les différents types de géothermies exploitables par site de Kankule sont :

- $\square < 30\text{ °C}$  et  $< 500\text{m}$ : géothermie superficielle. Ceci reprend les températures (enthalpie) très basses. Car à 257m de profondeur, on aura des températures d'au plus 30°C
- $\square$  entre 25-30°C et 150 °C et  $> 500\text{m}$ : géothermie profonde. Parce qu'à une profondeur de 500m, on aura déjà la température de 58.5°C. Afin de produire de l'électricité, il faudrait qu'on atteigne plus de 100°C. En creusant jusqu'à 1500m, soit 1.5km, de profondeur, on aura des températures atteignant 175.5°C. En allant jusqu'à 2000m de profondeur, on aura une température de 234°C. La production de l'électricité est alors possible à partir de 50°C comme le signale déjà [Géoscience ,2013].
- Pour Kankule IV, avec un gradient de 125, 471195 °C /km. On peut atteindre des températures souhaitées en allant puisées l'eau à plus de 2 km de profondeur, pour atteindre des températures de 234 °C. Un bon résultat quand on les compare déjà à celui de Soultz en France [SVT, 2019] et [Wikipédia, 2020]. Sur ce site d'Alsace en France, on va puiser l'eau à une profondeur de 5 km afin de produire de l'électricité. A chaque site de Kankule on pourra descendre jusqu'à 3 km de profondeur. Ceci puisque le volcanisme de Kankule résulterait du volcan éteint du Mont Kahuzi. Ce dernier a son sommet à 3308 m d'altitude quand un site de Kankule est à au moins 1565 m d'altitude. Au risque de ne pas dépasser la chambre magmatique, on ne devrait pas creuser au-delà de 3,5km de profondeur. Un tel scénario contribuerait à l'épuisement rapide dans l'exploitation d'un site. Des cas remarquables pour certaines centrales électriques géothermiques aux Etats-Unis ou en Italie. [<http://www.Wikipedia.fr/géothermie> , 2020]

4) Quelle puissance pourra-t-on produire par site de Kankule ?

Partons de  $T_{\text{eau}} = 43,789 + 0,481 T_{\text{sol}}$  [Adelin, 2013]. Pour Kankule IV par exemple, on atteint la température de 203 °C ; en considérant le gradient thermique moyen de ce site qui est 125, 471195 °C /km. Avec cette température de 203°C, la centrale géothermique de Soultz en Alsace fournit 13MW dont 2,1 MW de production de électrique brute [Wikipédia, 2020]. Ceci sous-entend qu'on devrait arriver à la même puissance au site de Kankule IV. Ainsi pour un site de Kankule, on pourrait produire 13MW dont 2,1 MW brut de production électrique. Soit pour l'ensemble de nos 14 sites, une puissance nette de 182 MW dont 29,1 MW brute d'électricité. Cette puissance devra croître après les premières années d'exploitation.

5) Jusqu'à quelle profondeur faudra-il creuser sur un site ?

Pour produire de l'électricité en un site par géothermie, la température minimale devrait être de 90°C [<http://www.Wikipedia.fr/géothermie> , 2020]. Ne voulant pas épuiser rapidement la ressource d'un site, nous avons opté pour une température maximale 203°C. Exploitant le Système d'Alerte Précoce (SAP) [Albert Kabasele, 2019], nous avons obtenu le tableau 3.3. Ce tableau actif permet de préciser jusqu'à quelle profondeur il faudra creuser, pour obtenir une température dans l'intervalle [90 ; 203]. Prenons un site

donné, à une température minimale comme 90°C, il correspond une profondeur minimale donnée. Et pour une température maximale comme 203°C, il correspond une profondeur maximale donnée en Excel. Prenons pour Kankule I, 90°C fait correspondre à 1019,21 m de profondeur. Et 203°C nous fait passer à 3514,15m. Si nous remplaçons 90°C par 100°C, la profondeur minimale change pour tous les sites. Pour Kankule I, nous trouvons 1231,54m. On fait les mêmes transformations pour la température maximale. Remplaçant 203°C par 220°C, nous aurons à Kankule I la profondeur de 3885,73m. Si au lieu de 220°C, on aurait pris 195°C ; le résultat obtenu est 3333,66m. En changeant le maximum ou le minimum de température, automatiquement les valeurs de profondeur changent en Excel dans tout le tableau.

## V. Conclusion

Partant des analyses et discussions faites, sur nos 14 sites d'eaux thermales nous pouvons conclure que :

- Les eaux thermales de Kankule ne sont pas interconnectées en profondeur entre elles, bien qu'alimentées par la même roche mère.
- Pour chaque site où il y a des thermes (ou eaux thermales), on pourrait y construire une centrale géothermique d'une puissance électrique de 2,1MW. Ceci malgré que toute autre application de la géothermie soit possible sur ce site. Cette énergie pourrait desservir la population avoisinante et réduire la consommation de la biomasse.
- L'installation d'une centrale électrique à Kankule, permettra à la longue d'envisager d'autres applications de la géothermie sur cette partie.

## Bibliographie

- [1]. Adelin Mulenda, 2013, **Modélisation du transfert des températures sol-air-eau thermale de Kankule dans Katana au Sud-Kivu**, Mémoire de D.E.A présenté à l'Université Pédagogique Nationale de Kinshasa (UPN /Kin), Faculté des Sciences, Département de Physique.
- [2]. Albert KABASELE YENGA-YENGA, 2019, **Modélisation du Fleuve Congo Et Marées Océaniques de Muanda Par Climatologie Spatiale**, Géosciences et Innovations Spatiales, Kinshasa.
- [3]. Albert KABASELE YENGA-YENGA, 2009, **Modélisation Saisonnière Limmétrie. Atmosphère et Imagerie satellitaire LANDSAT / SRTM dans le Bas Fleuve RD Congo**, Thèse de Doctorat présentée à l'Université Pédagogique
- [4]. Albert KABASELE YENGA-YENGA et alii, 2017, **Utilisation de Station Virtuelle LANSAT en Orbite Héliosynchrone dans l'Amélioration et la Validation des Anomalies Climatiques in Situ sur la ville Province de Kinshasa**, Géosciences et Innovations Spatiales, Kinshasa.
- [5]. BagalwaMasimango Jean-Jacques et alii, 2016, **Caractérisation physico-chimique des espèces végétales indicatrices des eaux thermales de Katana, Sud-Kivu, République Démocratique du Congo**, Afrique Science 11(5) (2015) 406-421 406 ISSN 1813-548X
- [6]. CER, 2007, **Revue des Energies Renouvelables, Détermination du champ de Température dans le sol, par un modèle semi-analytique. Conditions aux limites pour les besoins de simulation d'une serre de culture**
- [7]. **De la carte géologique de la région du Sud – Kivu**, 1939
- [8]. Ecorems.a, 2011, **Etude des obstacles à la géothermie profonde (basse et haute énergie)**, Rapport final, Département de l'énergie, Wallonie
- [9]. PNUD/UNOPS, octobre 1998, **Programme National de Relance du Secteur Agricole et Rural (PNSAR)**, monographie de la province du Sud-Kivu
- [10]. Nofziger D.I and al., 2003, **Soil Temperature change with Time and Depth: Theory**
- [11]. <http://www.arl.noaa.gov/ready.geomagn> , consulté le 20 mars 2018
- [12]. <http://www.geothermie-perspectives.fr/05-geothermie/index-html>, consulté le 9 janvier 2020
- [13]. <http://www.Wikipedia.fr/géothermie> , consulté le 19 septembre 2019

MULENDA MBUTO Adelin, et. al. "Etude Differentielle Des Sites Geothermiques De Kankule A Katana Au Sud-Kivu." *IOSR Journal of Applied Physics (IOSR-JAP)*, 12(3), 2020, pp. 37-45.