

Modélisation Des Températures Des Fissures Du Volcan Nyiragongo

BAHAYA BARHAHAMUKENYI Siméon¹, LUBEMBA ATCHIBIYA Michel¹ et KABASELE YENGA-YENGA Albert².

¹ Institut Supérieur Pédagogique (ISP-Bukavu) B.P 854 Bukavu, RDCongo

² Université Pédagogique Nationale (UPN-Kinshasa) B.P 8815 Kinshasa/Binza, RDCongo

Résumé

La température se présente comme une manifestation de l'énergie cinétique moyenne de translation des molécules d'une substance, due à l'agitation calorifique. Elle est une traduction à l'échelle macroscopique d'un état énergétique de la matière à l'échelle microscopique. Ses valeurs revêtent un intérêt particulier du fait qu'elles soient quelques fois liées à une situation à "risque" pouvant générer des phénomènes exceptionnels souvent dommageables tels que les vagues de chaleur, les éruptions volcaniques, ...

C'est ainsi que l'Observatoire Volcanologique de Goma (OVG) mesure les températures des fissures du volcan Nyiragongo à l'aide des capteurs thermiques en vue de suivre son activité afin de prédire une éventuelle éruption volcanique, ce dernier ayant déjà fait trop de dégâts matériels et humains. Mais, il arrive de fois que la pile du capteur se dépoliarise (se décharge), et il y a des moments où certaines fissures sont inaccessibles.

Notre étude permet alors d'établir un modèle pouvant permettre de déterminer les températures dans les fissures se trouvant à haute altitude, et celles contribuant plus à l'activité du volcan, connaissant les températures des fissures à basse altitude, et établir une corrélation entre les températures dans les fissures.

L'exploitation des logiciels SPSS 16.0, Excel et la méthode des multiplicateurs de Lagrange (des moindres carrés) nous ont conduits à l'Analyse des variances, au modèle de régression linéaire, et nous ont permis de modéliser les températures en établissant les équations linéaires de prédiction et les graphiques y afférent.

Le seuil de signification pris à plus au moins 5%, l'allure des graphiques et la confrontation des résultats modélisés aux données expérimentales nous ont permis de juger l'efficacité et la fiabilité du modèle.

Mots clés

Température, modélisation, corrélation, régression linéaire

Nomenclature

Mng°C = Temp-Munigi = Température de Munigi en degrés Celcius

Mgr°C = Temp-Mugara = Température de Mugara en degrés Celcius

Nyira°C = Temp-Nyira = Température de Nyiragongo cabanes en degrés Celcius

Date of Submission: 17-07-2020

Date of Acceptance: 01-08-2020

I. Introduction

Le volcan Nyiragongo, un des volcans actifs de la région des Virunga dans la branche occidentale du Rift Est Africain, est aujourd'hui compté parmi les volcans les plus actifs du monde (HAMAGUCHI et ZANA cités par WAFULA et al. 1998). Nyiragongo qui domine la ville de Goma, à plus de 2000m d'altitude au-dessus, se retrouve à 15 km seulement de cette ville et constitue un danger permanent pour ses habitants (WAFULA et al, 1988, op.cit). Il a déjà fait de dégâts matériels et causé la mort de plusieurs personnes.

L'Observatoire Volcanique de Goma (OVG) mesure les températures journalières des fissures par des capteurs thermiques mais des problèmes fondamentaux se posent : les fissures ne se trouvent pas à la même altitude (toutes ne contribuant pas à l'activité volcanique de la même façon), d'autres sont inaccessibles à certaines périodes (compte tenu des conditions climatiques et de l'insécurité dues aux groupes armés opérant du côté de certaines fissures). Il arrive de fois aussi que la pile d'un des capteurs se dépoliarise ou que le capteur soit volé.

Pouvons-nous alors établir un modèle qui permettra de déterminer les températures des fissures se trouvant à haute altitude connaissant les températures des fissures à basse altitude plus accessible et spécifier les fissures contribuant plus à l'activité du volcan ? Peut-on établir une corrélation entre les températures des fissures ?

L'objectif de cette étude est de modéliser les températures des fissures volcaniques, en évaluant la contribution de chaque fissure dans l'activité du volcan, en établissant une corrélation entre les températures

dans les fissures et les équations linéaires de prédiction des températures dans les fissures se trouvant à haute altitude connaissant celles des fissures à basse altitude.

II. Revue De La Littérature

2.1 La modélisation

La modélisation est la conception d'un modèle, elle permet d'analyser des phénomènes réels et de prévoir des résultats à partir de l'application d'une ou plusieurs théories à un niveau d'approximation donné.

Le principe d'un modèle est de remplacer un système complexe en un objet ou opérateur simple reproduisant les aspects ou comportements principaux de l'original (Éric GONCALVES DA SILVA, 2011).

Un modèle fournit une représentation à laquelle on puisse se référer quand on ne peut pas voir ce qui se produit réellement.

Un des modèles est "la régression linéaire" où une variable, x , est expliquée, modélisée par une fonction affine d'une autre variable y .

C'est une approche exploratoire ou alors la recherche d'une réponse à une question du type : une variable quantitative x a-t-elle une influence sur une variable quantitative y ? ou enfin, la recherche d'un modèle de prévision de y en fonction de x .

2.2 Concepts et modèle de régression linéaire

2.2.1 Corrélation et Coefficient de corrélation

La corrélation est un concept devenu concept statistique par le biais des travaux de Francis Galton. La corrélation la plus fréquente est celle de Bravais-Pearson (D'HAINAUT Louis, 1978)

Le coefficient de corrélation permet de détecter la présence ou l'absence d'une relation linéaire entre deux caractères quantitatifs continus.

La qualité de corrélation peut être mesurée par un coefficient de corrélation r , donné par la relation:

$$r = \frac{\sigma_{xy}}{\sigma_x \sigma_y} \quad (1)$$

Où σ_{xy} désigne la covariance entre les variables x et y , et σ_x, σ_y leur écart type.

Pour déterminer le coefficient de corrélation liant deux séries, connaissant les tableaux des valeurs: $x(x_1 \dots x_n)$ et $y(y_1 \dots y_n)$, on applique la formule suivante: (D'HAINAUT Louis, 1978)

$$r = \frac{\sum_{i=1}^N (x_i - \bar{x}) \cdot (y_i - \bar{y})}{\sqrt{\sum_{i=1}^N (x_i - \bar{x})^2} \cdot \sqrt{\sum_{i=1}^N (y_i - \bar{y})^2}} \quad (2)$$

Avec \bar{x} la moyenne de x et \bar{y} la moyenne de y : $\bar{x} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N x_i$ et $\bar{y} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N y_i$

Le coefficient de corrélation est compris entre -1 et +1. Plus il s'éloigne de zéro, meilleure est la corrélation (D'HAINAUT Louis, 1978)

$r = +1$: Corrélation positive parfaite (relation totale, les variables varient dans le même sens)

$r = -1$: Corrélation négative parfaite (relation totale, les variables varient en sens opposés)

$r = 0$: Absence totale de corrélation (les variables sont indépendantes)

Les valeurs intermédiaires renseignent sur le degré de dépendance linéaire entre les deux variables.

Un moyen assez simple d'interpréter un coefficient de corrélation est de considérer son carré. Le carré du coefficient de corrélation peut généralement être interprété comme la proportion de la variance de y qui est attribuable à la variance de x .

En somme, r^2 est une estimation de la "proportion de liaison" entre deux variables, tandis que $1 - r^2$ est une estimation de la "proportion d'aliénation" c'est à dire d'absence de liaison entre les deux variables.

Calculer le coefficient de corrélation entre deux variables numériques revient à chercher à résumer la liaison qui existe entre les variables à l'aide d'une droite. On parle alors de l'ajustement linéaire. La droite résultant de cet ajustement s'appelle une droite de régression.

2.2.2 Modèle de régression linéaire

Un modèle de régression linéaire est un modèle de régression d'une variable expliquée sur une ou plusieurs variables explicatives dans lequel on fait l'hypothèse que la fonction qui relie les variables explicatives à la variable expliquée est linéaire dans ses paramètres. Ce modèle a de nombreuses applications pratiques. Il permet notamment de faire des analyses de prédiction.

S'il existe entre la variable y et x une relation stricte linéaire, on peut prédire avec certitude toute valeur de y quand on connaît x .

Un modèle de régression linéaire est de la forme: $y = a + bx$; le terme d'erreur aléatoire du modèle étant négligé. Le seuil de signification donne l'exactitude de l'estimation.

Le modèle est linéaire en a et b , qui sont deux paramètres à estimer. On pourrait aussi prédire les résultats à l'aide d'un graphique. Il s'agira alors de déterminer la valeur de a et b ou de tracer le diagramme de dispersion ou la droite qui s'ajuste le mieux aux données.

On appelle "droite de régression" une droite qui représente la relation linéaire entre "la variable- critère" y (la variable dont on veut prédire la valeur) et la "variable-prédicteur" (la variable qui sert à prédire), et qui s'ajuste le mieux aux données.

III. Approche Méthodologique

Dans cette partie nous allons exposer les méthodes que nous allons utiliser, mais avant tout nous allons prendre connaissance du milieu dans lequel notre étude se déroule.

3.1 Site du volcan Nyiragongo

Le volcan Nyiragongo (celui qui fume) se dresse dans la partie centrale de la branche occidentale du rift Est-Africain. Le Nyiragongo est situé en Afrique de l'Est, à l'extrême Est de la République Démocratique du Congo (RDCongo), à proximité de la frontière rwandaise située au sud-est, à 15km au nord du lac Kivu et de la ville de Goma qu'il domine du haut de ses 3470m d'altitude (Latitude/Longitude : 1.52S/29.25E) (OVG, 2009).

C'est un volcan du type de ceux qui sont dus à une concentration locale de chaleur dans certains points du manteau et appartient à la chaîne des Virunga qui est un massif volcanique constitué par l'alignement de 8 volcans. (BAHAYA, 2013)



Figure 1- Vue de la ville de Goma en face du volcan Nyiragongo (Photo OVG)

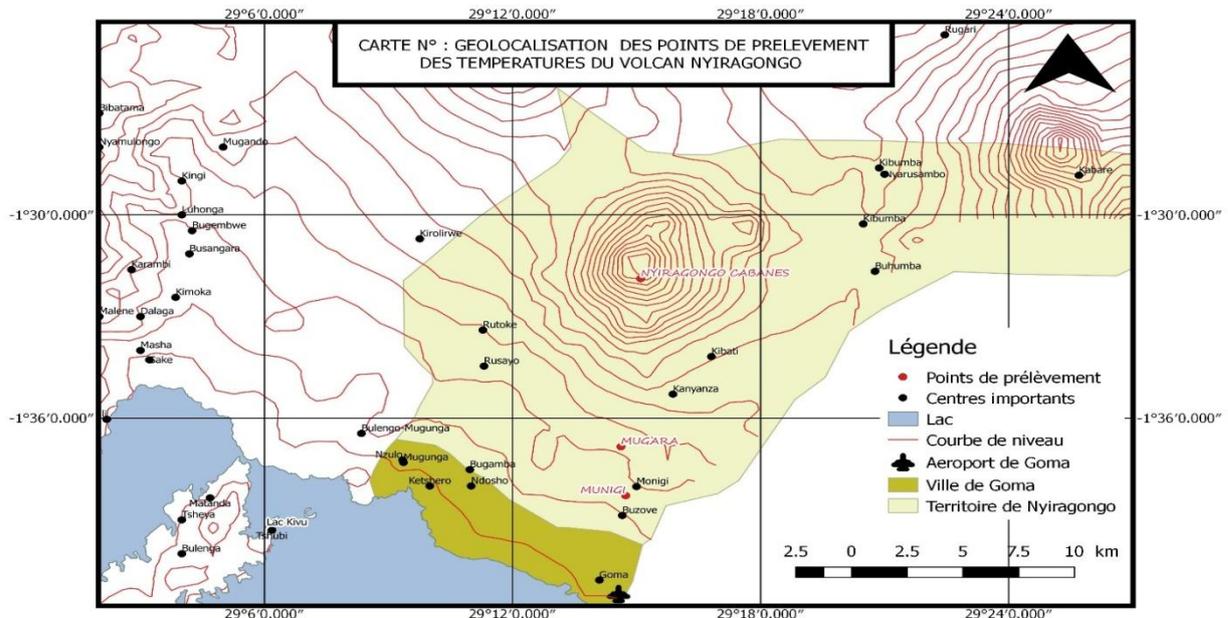


Figure 2- Géolocalisation des points de prélèvement des températures du Volcan Nyiragongo (carte auteurs)

3.2 Matériels et procédure d'expérimentation

Trois fissures ont été retenues pour notre étude : la fissure de MUNIGI (SO 1° 63,588; EO 29° 24,565) à une altitude de 1619 m, celle de MUGARA (SO 1° 36,841; EO 29° 14,627) qui se trouve à une altitude de 1744 m, et celle de NYIRAGONGO CABANES (SO 1° 52,901; EO 29° 24,980) qui se trouve à une altitude de 3089 m.

Les coordonnées de ces fissures ont été repérées à l'aide du GPS différentielle par les chercheurs de l'OVG. Le repérage des températures s'est fait à l'aide d'un capteur thermique muni d'une sonde d'environ 15cm de long.



Figure 3-Capteur thermique (Laboratoire OVG)

On introduit la sonde du capteur thermique dans la fissure, le capteur enregistre 144 données par jour et on fait la moyenne pour avoir une température journalière. Le capteur peut enregistrer des températures allant de -50° C à 300° C / 600° C.

Le capteur enregistre en continu et garde les données dans son mémoire. Le logiciel TINYTAG permet le téléchargement.

3.3 Échantillonnage

Avant tout travail de modélisation, une approche descriptive ou exploratoire est nécessaire pour dépister au plus tôt des difficultés dans les données : dissymétrie des distributions, valeurs atypiques, liaison non linéaire entre les variables.

Les données de base, les températures des fissures sont des moyennes journalières, mises à notre disposition par le département de Géophysique de l'OVG, réparties sur les périodes suivantes : du 28 mars 2003 au 31 mai 2005, une année après l'éruption volcanique de 2002 et du 1 janvier 2005 au 28 avril 2011 ; soient 1943 données par fissure.

Compte tenu des difficultés évoquées (dépolariation de la pile du capteur, vol du capteur, parfois non accessibilité aux fissures, ...) certaines données manquaient. Pour compléter les trous de ces données, le remplissage se faisait en utilisant :

- La méthode des moyennes : Nous avons utilisés cette méthode quand on a un seul trou. On fait la moyenne de deux valeurs entourant le trou.

- La méthode de plus proches voisins : Cette méthode a été utilisée lorsqu'on a plusieurs trous successifs. Dans ce cas on fait un rééchantillonnage

En effet, si la station de Munigi présente des trous, on se sert des données de la station la plus proche, celle de Mugara. On calcule un multiplicateur (Indice I) en faisant le rapport des températures voisines des trous de Mugara et Munigi de la même période pour les deux stations.

$$I = \frac{\text{Moyenne Mugara}}{\text{Moyenne Munigi}}$$

Les températures à attribuer à Munigi seront alors celles de Mugara, de la même période que la période manquante, multiplié par le multiplicateur (Indice) I .

Exemple : Moyenne Mugara = 27,2876556 ; Moyenne Munigi = 24,39

$$I = \frac{\text{Moyenne Mugara}}{\text{Moyenne Munigi}} = \frac{27,2876556}{24,39} = 1,118805067$$

Données Munigi = Données Mugara x I

Lorsque nous trouvons une donnée aberrante c'est à dire un pic d'aberration (une mesure qui s'écarte sensiblement des autres), nous calculons la valeur moyenne de deux valeurs qui entourent cette donnée aberrante.

3.4 Méthode statistique

Nous avons utilisé le logiciel SPSS 16.0 logiciel conçu pour mener une grande diversité de tests statistiques avec rapidité. Il est essentiel de vérifier si les données ont été correctement saisies dans l'ordinateur sous EXCELL en vue d'élaborer une base des données.

SPSS 16.0 a divers menus et chaque menu a des sous-menus, on doit alors les choisir et savoir comment compléter les boîtes de dialogue.

En termes d'exploration des données, on exploite :

- Le menu Analyse, dans lequel on trouve Rapports, Statistiques descriptives, Tabuler, corrélation, régression, ...
- Les sous menus Réduction des dimensions, Analyse factorielle qui permet l'analyse en composantes principales, classification hiérarchisée, ...

Pour accéder à la régression simple, on choisit Analyse, et Régression linéaire. Le tableau des moyennes et écarts-types s'obtient en ouvrant la boîte de dialogue Corrélation. Ce traitement statistique nous a conduits à l'Analyse des Variances.

Nous utilisons le modèle de régression linéaire (*modèle B*), un modèle de régression d'une variable expliquée sur une ou plusieurs explicatives dans lequel la fonction qui relie les variables est linéaire. Le modèle B nous donne le coefficient angulaire et la constante.

Le logiciel a été employé pour l'ensemble des analyses statistiques, le seuil de signification a été fixé à 0,05 (5 %).

3.5 Méthode analytique

3.5.1 Modèle de régression linéaire : Détermination des droites de régression

Le coefficient angulaire b et le coefficient a de la droite sont déterminés par les relations: (OLIVIER Martin, 2007)

$$b = \frac{\sum(x_i - \bar{x}) \cdot (y_i - \bar{y})}{\sum(x_i - \bar{x})^2} \quad (3)$$

Et puisque les moyennes \bar{y} et \bar{x} sont des valeurs correspondantes, on a: $\bar{y} = a + b \bar{x}$, donc: (D'HAINAUT Louis, 1978 et OLIVIER Martin, 2007)

$$a = \bar{y} - b \bar{x} \quad (4)$$

On prédit y à partir de x , on a $y^* = a + bx$ (équation représentant la droite des moindres carrés).

Avec $a = \bar{y} - b \bar{x}$, l'équation de la droite de régression prend la forme: (D'HAINAUT Louis, 1978, op cit)

$$y^* = \bar{y} - b \bar{x} + bx = \bar{y} + b(x - \bar{x}) \quad (5)$$

Le paramètre a de la droite de régression indique combien varie en moyenne la valeur de y lorsque celle de x augmente d'une unité. Le paramètre b correspond à la valeur théorique de y lorsque la valeur de $x = 0$.

Le modèle de régression linéaire est souvent estimé par la méthode des moindres carrés, bien qu'il existe d'autres méthodes pour estimer ce modèle.

Ainsi, pour estimer les paramètres a et b on peut utiliser aussi la méthode de moindres carrés qui ne nécessite pas d'hypothèse supplémentaire sur la distribution du terme d'erreur aléatoire.

Quand une équation de régression est utilisée pour estimer une variable y à partir de celles d'une ou des plusieurs variables indépendantes, x , l'estimation (valeur modélisée) y^* n'atteint pas habituellement l'exactitude complète. Géométriquement parlant, les points des données ne tombent pas exactement sur la ligne de droite, le plan ou l'hyperplan spécifié par l'équation de régression. La différence ($y - y^*$) sur les valeurs prédites sont appelées "résidus"

Un résidu est alors la différence entre la valeur réelle de la valeur dépendante et sa valeur prédite en utilisant l'équation de régression (KINNEAR et GRAY, 2006)

3.5.2 Méthode des multiplicateurs de Lagrange (des moindres carrés)

1° Principe de la méthode des moindres carrés

La méthode des moindres carrés permet de comparer de données expérimentales, généralement entachées d'erreurs de mesure à un modèle mathématique censé décrire ces données. Cette méthode permet de minimiser l'impact des erreurs expérimentales et évaluer les valeurs probables des paramètres de la loi recherchée, ainsi "ajoutant de l'information" dans le processus de mesure.

En considérant la fonction $z = ay + bx + c$, le critère des moindres carrés s'écrit, (avec a, b et c qui rendent minimale la somme des carrés) : $\sum(ay_i + bx_i + c - z_i)^2$ (MONINO J.L. 2010)

2° Droite de régression linéaire : Calcul des coefficients

On appelle droite de régression (ou droite d'ajustement par la méthode des moindres carrés), la droite d'équation $z = ay + bx + c$ qui satisfait au critère des moindres carrés. (MONINO J.L. 2010 op. cit)

Considérons l'équation de prédiction :

$$z = ay + bx + c \tag{6}$$

La prescription des moindres carrés s'écrit pour ce type de modèle: $\delta = \sum (ay_i + bx_i + c - z_i)^2$

Le minimum de cette expression est trouvé quand les dérivées partielles sont égales à zéro.

Cherchons les valeurs de a, b et c qui minimisent la somme des carrés des résidus c'est à dire les écarts entre les observations z_i et les prédictions $ay_i + bx_i + c$, ainsi:

$$\begin{aligned} \frac{\partial \delta}{\partial a} &= 2 \sum y_i (ay_i + bx_i + c - z_i) = 0 \\ \frac{\partial \delta}{\partial b} &= 2 \sum x_i (ay_i + bx_i + c - z_i) = 0 \\ \frac{\partial \delta}{\partial c} &= 2 \sum 1 (ay_i + bx_i + c - z_i) = 0 \end{aligned}$$

Ce qui donne un système de 3 équations à 3 inconnues (a, b et c) à résoudre

$$\begin{cases} a \sum_i^N y_i^2 + b \sum_i^N x_i y_i + c \sum_i^N y_i = \sum_i^N y_i z_i \\ a \sum_i^N x_i y_i + b \sum_i^N x_i^2 + c \sum_i^N x_i = \sum_i^N x_i z_i \\ a \sum_i^N y_i + b \sum_i^N x_i + cN = \sum_i^N z_i \end{cases} \tag{7}$$

Ce système d'équations peut être écrit sous forme matricielle :

$$\begin{bmatrix} \sum_i^N y_i^2 & \sum_i^N x_i y_i & \sum_i^N y_i \\ \sum_i^N x_i y_i & \sum_i^N x_i^2 & \sum_i^N x_i \\ \sum_i^N y_i & \sum_i^N x_i & N \end{bmatrix} \begin{bmatrix} a \\ b \\ c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \sum_i^N y_i z_i \\ \sum_i^N x_i z_i \\ \sum_i^N z_i \end{bmatrix}$$

Les valeurs des multiplicateurs de Lagrange ou coefficients a, b et c seront trouvées en faisant le rapport des déterminants, en utilisant la méthode de Cramer: (BAHAYA, 2013 op. cit)

$$a = \frac{D_a}{D}; \quad b = \frac{D_b}{D}; \quad c = \frac{D_c}{D} \tag{8}$$

Avec :

$$\begin{aligned} D &= \begin{bmatrix} \sum_i^N y_i^2 & \sum_i^N x_i y_i & \sum_i^N y_i \\ \sum_i^N x_i y_i & \sum_i^N x_i^2 & \sum_i^N x_i \\ \sum_i^N y_i & \sum_i^N x_i & N \end{bmatrix}; \quad D_a = \begin{bmatrix} \sum_i^N y_i z_i & \sum_i^N x_i y_i & \sum_i^N y_i \\ \sum_i^N x_i z_i & \sum_i^N x_i^2 & \sum_i^N x_i \\ \sum_i^N z_i & \sum_i^N x_i & N \end{bmatrix} \\ D_b &= \begin{bmatrix} \sum_i^N y_i^2 & \sum_i^N y_i z_i & \sum_i^N y_i \\ \sum_i^N x_i y_i & \sum_i^N x_i z_i & \sum_i^N x_i \\ \sum_i^N y_i & \sum_i^N z_i & N \end{bmatrix}; \quad D_c = \begin{bmatrix} \sum_i^N y_i^2 & \sum_i^N x_i y_i & \sum_i^N y_i z_i \\ \sum_i^N x_i y_i & \sum_i^N x_i^2 & \sum_i^N x_i z_i \\ \sum_i^N y_i & \sum_i^N x_i & N \end{bmatrix} \end{aligned}$$

IV. Présentation Et Interprétation Des Résultats

Dans cette partie nous présentons les résultats c'est à dire les équations modélisées et les graphiques y afférent. Les données des températures expérimentales (mesurées in situ), exprimées en degrés Celsius, sont journalières (1493 données par fissure), ne sont pas reprises dans ce travail compte tenu de la taille. Les graphiques et tableaux sont suivis d'un petit commentaire d'interprétation.

4.1 Classification hiérarchisée

Le diagramme généré par un regroupement hiérarchique donne la distance des fissures par rapport à l'échelle de 0 à 25.

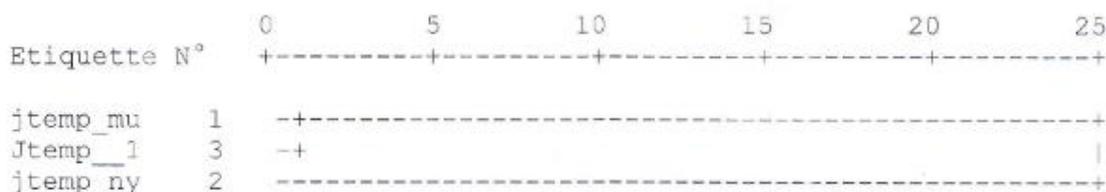


Figure 4-Schéma du Dendrogramme

Nom (Abregé) Nom(Etendu)

jtemp_mujtemp_munigi

jtemp_1 jtemp_mugara
 jtemp_nyjtemp_nyiragongo cabanes

Ce dendrogramme montre que les fissures de Mugara et Munigi sont très proches et Nyiragongo cabanes s'écarte des autres fissures. Mugara et Munigi: 1/25 soit 4 % et Nyiragongo cabanes: 25/25 soit 100 % . Le résultat du dendrogramme est bien vérifié partant des altitudes des fissures :Munigi est à 1619m, Mugara à 1749 m et Nyiragongo cabanes à 3089 m.

Tableau 1- Valeurs statistiques

	N	Minimum	Maximum	Moyenne	Ecart type
Fissure_munigi	1943	10,04555448	43,35000000	3,4540434211E1	7,65118630050E0
Fissure_mugara	1943	8,13914563	42,46130893	3,2870843132E1	6,21999850565E0
Fissure_nyira cabanes	1943	3,27600000	44,76666667	2,4769128879E1	1,20105063933E1

Ce tableau nous donne les valeurs statistiques liées aux résidus par fissure : le nombre de données N, les températures minimales et maximales, les moyennes et écart type.

La plus haute température moyenne est celle de Munigi. L'écart type nous donne la différence entre la valeur de référence et la valeur observée. Le tableau montre que l'écart type de la fissure Nyiragongo cabanes est supérieur à ceux de deux autres, de ce fait il y aura une différence significative entre les températures expérimentales (de référence) et les températures observées de la fissure Nyiragongo cabanes.

4.2 Coefficient de corrélation

4.2.1 Coefficients de corrélation générés par le logiciel

La corrélation entre deux variables numériques (températures) revient à chercher, à résumer la liaison qui existe entre ces températures.

Tableau 2-Coefficients de corrélation

		Fissure_munigi	Fissure_mugara	Fissure_nyira
Corrélation	Fissure_munigi	1,000	,873	,228
	Fissure_mugara	,873	1,000	,464
	Fissure-nyira	,228	,464	1,000
Sig.	Fissure_munigi		,000	,000
	Fissure_mugara	,000		,000
	Fissure-nyira	,000	,000	

Le tableau 2 montre que :

- Chaque fissure est en corrélation positive parfaite avec elle-même à 100%
- Le coefficient de corrélation entreMunigi et Mugaraest de 87,3%, entre Munigi et Nyiragongo cabanes il est de 22,8 %, et entre Nyiragongo cabanes et Mugara, il est de 46,4 %. Toutes ces valeurs des coefficients de corrélation sont fiables car toutes les significations sont nulles (sig=0%).

4.2.2 Calcul des coefficients de corrélation

En utilisant la relation (2) nous calculons les coefficients de corrélation repris dans la colonne 3 du tableau 3.

En effet, ce coefficient de corrélation est égal au rapport de la covariance et du produit non nul des écarts types.

Tableau 3- Tableau comparatif des coefficients de corrélation

Fissure	Coefficient de corrélation(SPSS)	Coefficient de corrélation(calculé)	Signification
Munigi-Mugara	,873	,859	,0163
Mugara-Nyira cabanes	,464	,460	,0087
Munigi-Nyira cabanes	,228	,229	,0044

Ce tableau permet de comparer les coefficients de corrélation obtenus par le logiciel SPSS et ceux obtenus par calcul en utilisant la relation (2).

Le seuil de signification étant inférieur à 5%, les résultats obtenus par le logiciel SPSS sont fiables.

Considérons le carré du coefficient de corrélation pour estimer la "proportion de liaison" entre les températures dans différentes fissures :

- Munigi et Mugara
 $r = 0,873, r^2 = 0,762$; il y a 76,2% de liaisonet 23,8% d'aliénation (d'absence de liaison) entre les températures de Munigi et celles de Mugara.
- Mugara et Nyiragongo cabanes

$r = 0,464$, $r^2 = 0,215$; il y a 21,5% de liaison et 78,5% d'absence de liaison entre les températures de Mugara et celles de Nyiragongo cabanes.

- Munigi et Nyiragongo cabanes

$r = 0,228$, $r^2 = 0,0519$; il y a 5,19% de liaison et 94,81% d'aliénation (d'absence de liaison) entre les températures de Munigi et celles de Nyiragongo cabanes.

4.3 Analyse des composantes principales

Cette analyse nous donne la contribution de chaque fissure à l'évacuation de la chaleur (Extraction du poids de modèle par composante).

Tableau 4- Qualité de représentation de chaque fissure

	Initial	Extraction
Fissure_munigi	1,000	,936
Fissure_mugara	1,000	,802
Fissure Nyira cabanes	1,000	,357

En termes d'évacuation de chaleur, la fissure de Munigi contribue à 93,6%, celle de Mugara à 80,2% et Nyiragongo cabanes à 35,7%. On remarque que la fissure de Munigi explique, à elle seule, le comportement du volcan à 93,6 % en ce qui concerne l'évacuation de la chaleur et celle de Mugara à 80,2%.

4.4 Prédiction des températures de la fissure Nyiragongo cabanes

4.4.1 Prédiction des températures de Nyiragongo cabanes en fonction des températures de Mugara et Munigi

1° Coefficients de prédiction

Variable dépendante : Temp_Nyiragongo cabanes

Prédicteurs :Temp_ Mugara; Temp_ Mugara et Munigi

Table 5-Tableau des coefficients (var dépendante Temp- Nyira)

Modèle	Coefficients non standardisés		Sig
	B	Erreur standard	
1 (constante)	-1,218	1,331	,360
Fissure_mugara	,749	,037	,000
2 (constante)	10,039	1,381	,000
Fissure_mugara	1,794	,070	,000
Fissure_munigi	-1,449	,085	,000

Ce tableau nous donne des coefficients pour nous permettre d'établir les équations de régression.

Les valeurs du coefficient de régression et de la constante sont fournies dans la colonne B du tableau. Les autres données statistiques listées sont l'erreur standard du coefficient de régression et le seuil de signification.

Nous trouvons deux modèles :

Le modèle 1 nous donne la prédiction des températures de Nyiragongo cabanes en fonction de Mugara seule et le modèle 2, en fonction de Munigi et Mugara.

La prédiction des températures de Nyiragongo cabanes en fonction des températures de Mugaraseule est donnée, suivant un modèle affine B, par :

$$Nyira^{\circ} C = 0,749 Mgr^{\circ} C - 1,218 \quad (9)$$

Bien que la constante soit biaisé car son seuil de signification est supérieur à 5 %, soit 36%, l'équation de régression garde sa valeur prédictive car le seuil de signification du coefficient de prédiction (coefficient angulaire) est nul (sig=0%) et son erreur standard est de 3,7 % .

La prédiction des températures de Nyiragongo cabanes en fonction de celles de Munigi et Mugara est donnée par la relation suivante :

$$Nyira^{\circ} C = 1,794 Mgr^{\circ} C - 1,449 Mng^{\circ} C + 10,039 \quad (10)$$

On a une fonction de prédiction à deux variables, fiable en tenant compte du seuil de signification qui est nulle pour la constante et pour le coefficient angulaire (sig=0).

2° Graphique

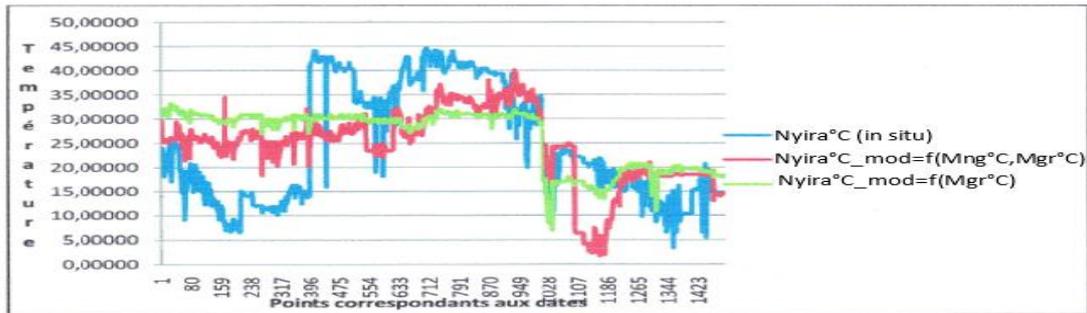


Figure 5- Graphique des variations des températures de Nyiragongo cabanes en fonction de celles de Munigi et de Mugara

Les graphes de cette figure ont même allure, ceci prouve qu'il y a corrélation, mais en certains points les données des graphes modélisées s'écartent des données expérimentales (mesures in situ) de Nyiragongo cabanes.

Considérons la répartition statistique des températures de la fissure Nyiragongo cabanes.

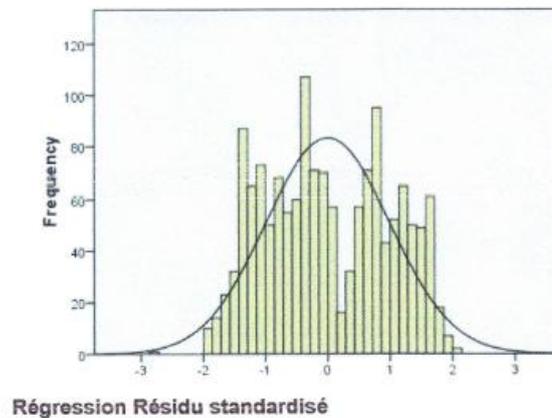


Figure 6- Histogramme et courbe normale superposés (var dépendante : Temp-Nyira)

L'histogramme donne la forme de la distribution c'est à dire les fréquences relatives avec les quelles la série de mesure doit être trouvée, la distribution étant gaussienne.

La distribution des températures donne des valeurs symétriques autour de la moyenne, il y a une valeur qui s'écarte le plus de la moyenne.

La valeur moyenne (24,769° C) se répète à peu près 70 fois dans la distribution (fréquence égale à 70). La valeur modale est proche de la moyenne et se répète 110 fois à peu près. De ce fait, la moyenne représente exactement la température de la fissure Nyiragongo cabanes.

3° Diagramme de régression

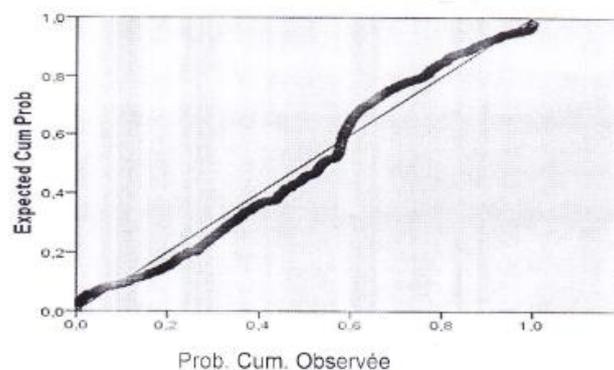


Figure 7- Diagramme de la droite de régression (var dépendante : Temp-Nyira)

La courbe représente les données et la droite représente la régression qui prouve que la régression est linéaire. L'ajustement déterminé par la droite est le meilleur estimateur de la pente et de l'ordonnée à l'origine

4.4.2 Prédiction des températures de Nyiragongocabanes en fonction des températures de Mugara et Munigi par la méthode des multiplicateurs de Lagrange

1° Calcul des coefficients de prédiction

Considérons l'équation de prédiction (6), $z = ay + bx + c$, avec $z = \text{Nyira}^\circ\text{C}$, $y = \text{Mgr}^\circ\text{C}$ et $x = \text{Mng}^\circ\text{C}$.

a, b et c sont les coefficients à déterminer partant du système d'équation (8) et après calcul des déterminants, on obtient:

$$a = \frac{D_a}{D} = \frac{-0,00024 \cdot 10^{16}}{0,00019 \cdot 10^{16}} = -1,263157895$$

$$b = \frac{D_b}{D} = \frac{0,00304 \cdot 10^{15}}{0,00019 \cdot 10^{16}} = 1,600000000$$

$$c = \frac{D_c}{D} = \frac{0,00021 \cdot 10^{17}}{0,00019 \cdot 10^{16}} = 11,05263158$$

L'équation de prédiction $z = ay + bx + c$ est alors :

$$\text{Nyira}^\circ\text{C}_{Lagr} = 11,05263158 - 1,263157895 \text{Mgr}^\circ\text{C} + 1,6 \text{Mng}^\circ\text{C} \quad (11)$$

Cette équation (11) représente une régression linéaire à deux variables.

Représentons graphiquement les équations (10) et (11) de Nyiragongo cabanes en fonction de Mugara et Munigi

2° Graphique

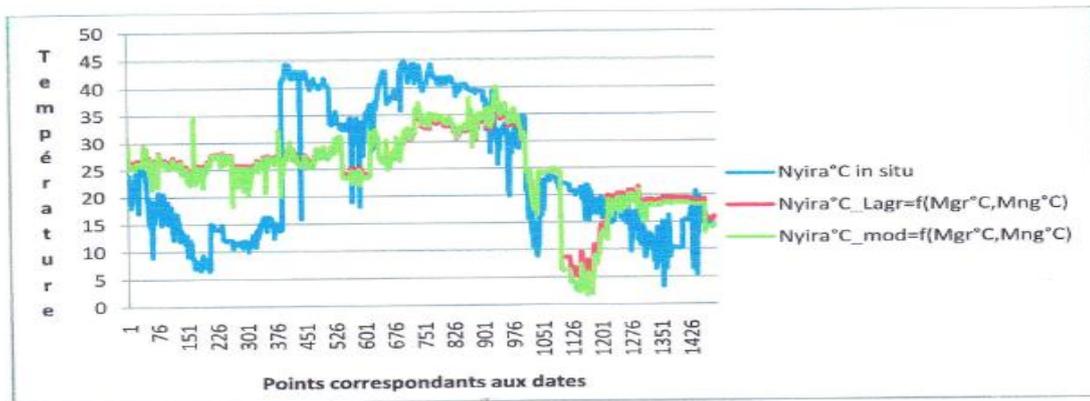


Figure 8- Graphique de variation des températures de Nyiragongo cabanes en fonction de celles de Mugara et Munigi.

Les graphes de Nyiragongo cabanes en fonction de Mugara et Munigi de l'équation modélisée et celle obtenue en utilisant les multiplicateurs de Lagrange (des moindres carrés) représentent une même prédiction, ces deux graphes sont confondus, contrairement aux graphes de la figure (5) eux ont même allure mais ne sont pas confondus. Il y a corrélation entre les valeurs expérimentales (mesurées in situ) et les valeurs calculées par modélisation. Ce qui prouve que nos deux modèles sont fiables. Toutefois, il y a une différence entre les valeurs expérimentales et les valeurs modélisées compte tenu de la corrélation faible entre Nyiragongo cabanes et les deux autres fissures. Les anomalies liées à certaines données qui manquaient ou l'altitude de Nyiragongo cabanes par rapport aux deux autres peuvent en expliquer.

4.4.3 Prédiction des températures de Nyiragongo cabanes en fonction des températures de Munigi

1° Coefficients de prédiction

Considérons le tableau des coefficients générés par le logiciel.

Tableau 6-tableau des coefficients (var dépendante Temp_Nyira cabanes)

Modèle	Coefficients non standardisés		Sig
	B	Erreur standard	
Fissure_mugara(constante)	,446	,050	,000
	10,188	1,663	,000

Variable dépendante : Fissure Nyiragongo cabanes

Prédicteur : Fissure Munigi

L'équation de Prédiction est donnée par :

$$Nyira^{\circ} C = 10,188 + 0,446 Mng^{\circ} C \quad (12)$$

2° Graphique

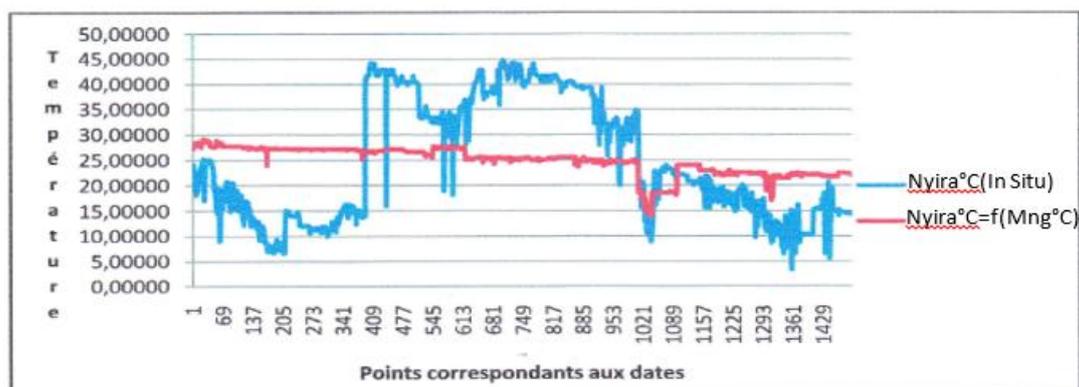


Figure 9- Graphique des variations des températures de Nyiragongo cabanes en fonction de celles de Munigi

Ce graphique traduit l'équation modélisée (12) associé à celui des valeurs expérimentales.

Le seuil de signification étant 0,00 pour le coefficient et la constante (ordonnée à l'origine).

Le graphe de Nyiragongo cabanes (pour les données expérimentales) n'a pas la même allure que celui de Nyiragongo cabanes en fonction de Munigi, la corrélation entre les températures de ces deux fissures étant très faible (22,8% de liaison et 94,81% d'absence de liaison).

4.5 Prédiction des températures dans les fissures déterminant l'activité du volcan

Considérons maintenant les fissures qui déterminent l'activité du volcan : les fissures de Munigi et Mugara.

Mugara étant à une haute altitude par rapport à Munigi, nous allons prédire les températures de Mugara connaissant celles de Munigi se trouvant à basse altitude ; de même prédire celles de Mugara en fonction de celles des Munigi et Nyiragongo cabanes.

4.5.1 Prédiction des températures de Mugara en fonction des températures de Munigi et de Nyiragongo cabanes

1° Coefficients de prédiction

Considérons le tableau des coefficients généré par le logiciel.

Tableau 7-Tableau des coefficients (var dépendante Temp_Mugara)

Modèle	Coefficients non standardisés		Sig
	B	Erreur standard	
1 (Constante)	,083	,517	,872
Fissure_munigi	1,056	,015	,000
2 (Constante)	-1,684	,435	,000
Fissure_munigi	,979	,013	,000
Fissure_nyira	,173	,007	,000

Prédicteur 1 : Temp-Munigi

Prédicteur 2 :Temp-Munigi et Temp-Nyira cabanes

Variable dépendante:Temp-Mugara

Le modèle 1 donne la prédiction des températures de Mugara en fonction des celles de Munigi seule et le modèle 2 donne cette prédiction en fonction des températures de Munigi et Nyiragongo cabanes.

L'équation de prédiction obtenue partant du modèle 1 est donnée par :

$$Mng^{\circ} C = 0,083 + 1,056 Nyira^{\circ} C \quad (13)$$

Le seuil de signification est nul pour le coefficient de prédiction (coefficient angulaire) (sig=0), l'erreur standard étant de 1,5% <5% et pour la constante sig= 87,2% >5%.

Cette équation de régression garde toute sa valeur prédictive car c'est le coefficient angulaire qui caractérise le phénomène.

L'équation obtenue par le modèle 2 est :

$$Mng^{\circ} C = 1,056 Mng^{\circ} C + 0,173 Nyira^{\circ} C - 1,684 \quad (14)$$

Cette équation (14) est fiable car le seuil de signification est nul (sig=0%) pour la constante et pour les deux coefficients. Les erreurs standards sont supérieures à 5% pour la constante mais inférieures à 5% pour les deux coefficients. Cette équation reste valable mais la seule préoccupation est que la fissure Nyiragongo cabanes se trouve à haute altitude, son accessibilité n'est pas facile.

L'équation (13) suffira alors pour prédire les températures de Mugara en fonction de Munigi.

2° Graphique

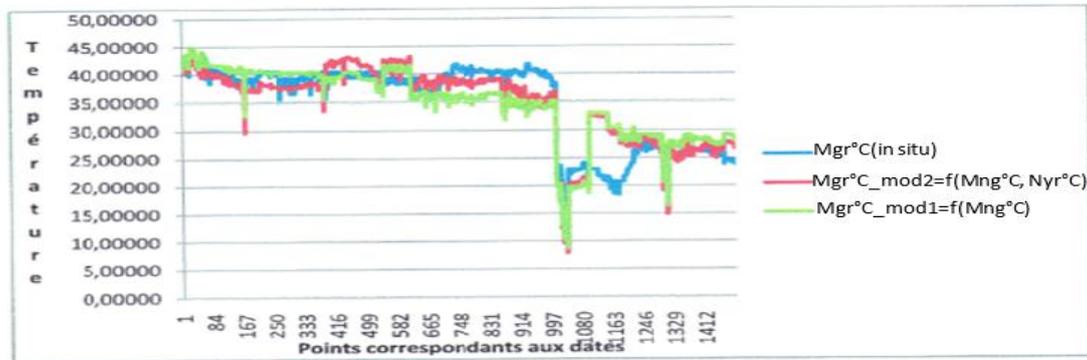


Figure 10-Graphique des températures de Mugara en fonction de celles de Munigi et Nyiragongo cabanes

Ce graphique confirme notre interprétation du seuil de signification de ces deux modèles du tableau 7. Les graphes les montrent car étant presque confondus avec celui qui représente les valeurs expérimentales. Les deux équations (13) et (14) ont une valeur prédictive.

4.5.2 Prédiction des températures de Mugara en fonction des températures de Munigi

Dressons les tableaux d'Analyse des Variances et des coefficients pour établir l'équation de prédiction.

1° Analyse des Variances

Tableau 8- Tableau d'Analyse des Variances (var dépendante : Temp_mugara)

Modèle	Somme des carrés	Moyenne des carrés	F	sig
1 Régression	64639,030	64639,030	4,011E3	,000
Résidus	24027,675	16,115		
Total	88666,705			

Ce tableau montre que le seuil de signification du coefficient de Fischer F est nul (sig=0), de ce fait il y aura linéarité. Ce coefficient est utilisé dans un but descriptif. Vérifions cette linéarité en établissant l'équation partant du tableau des coefficients.

Tableau 9- Tableau des coefficients (var dépendante Temp- Mugara)

Modèle	Coefficients non standardisés		Sig
	B	Erreur standard	
1 (constante)	-,186	,550	,073
Fissure_munigi	1,056	,017	,000

Partant des coefficients de ce tableau nous établissons l'équation de régression suivante :

$$Mgr^{\circ}C = 1,056 Mng^{\circ}C - 0,186 \quad (15)$$

L'équation (15) est obtenue par le modèle 1, le seuil de signification du coefficient de prédiction est nul (sig=0%) , celui de la constante est de 7,3% > 5% .

Cette équation de régression garde toute sa valeur prédictive et représente exactement la forme $y = bx + a$; avec $b = 1,056$ et $a = -0,186$.

On remarque que les deux équations de prédiction, (13) et (15), des températures de Mugara en fonction des températures de Munigi seule, ont même coefficient de prédiction (coefficient angulaire égal à 1,056) seules les constantes sont différentes (ordonnée à l'origine).

La prédiction de températures de Mugara en fonction de Munigi seule donne des résultats fiables, avec un seuil de signification très proche de zéro en comparant les valeurs expérimentales (mesurées in situ) et les valeurs estimées(modélisées).

4.5.3 Prédiction des températures de Mugara en fonction des températures de Munigi par le modèle de régression linéaire

1° Calcul des coefficients de Prédiction\

L'équation de la droite est de la forme $y^* = bx + a$

y^* représente la valeur prédite (estimée) des températures de Mugara, y représente la valeur expérimentale de Mugara et x représente la valeur expérimentale de Munigi.

Calculons les coefficients de la droite de régression a et b partant des relations (3) et (4).

La relation (3) donne le coefficient angulaire :

$$b = \frac{\sum(x_i - \bar{x}) \cdot (y_i - \bar{y})}{\sum(x_i - \bar{x})^2} = \frac{60365,81416}{56593,9023} = 1,0666481416$$

La relation (4) donne le coefficient de prédiction :

$$a = \bar{y} - b \bar{x} = 34,51679297 - 1,066648733 \cdot 32,8090651 = -0,47895475$$

L'équation est alors : $y^* = 1,066648733x - 0,47895475$

En tenant compte des températures des fissures, l'équation obtenue par ce modèle est alors :

$$M_{gr}^{\circ}C = 1,066648733M_{ng}^{\circ}C - 0,47895475 \quad (16)$$

L'équation (16) est obtenue en appliquant le modèle 2 (modèle de régression linéaire).

En calculant le seuil de signification, entre les valeurs expérimentales (mesurées in situ) et les valeurs estimées(modélisées), par la relation $\text{sig} = \frac{y - y^*}{y}$ en utilisant la relation des résidus $y^* - y$, on trouve que $\text{sig} < 0,05$

Ceci prouve que les résultats que nous obtenons en utilisant la relation (16) issue du calcul des coefficients de prédiction b et a sont fiables et le modèle est bon.

2° Graphique



Figure 11- Graphique des températures de Mugara en fonction de celles de Munigi seule

Ce graphique prouve aussi que la prédiction de températures de Mugara en fonction de celles de Munigi seule donne des bons résultats; les graphes traduisant les deux équations modélisées (15) et (16) sont confondus à 100%. On ne sait pas voir le graphe de couleur rouge, représentant l'équation (15), car superposé à celui de couleur verte représentant l'équation (16). Ceci prouve l'exactitude et la fiabilité de ces deux équations et la véracité de ces deux modèles.

Le graphe des valeurs expérimentales (valeurs in situ) et ceux des valeurs estimées par les deux modèles ont même allure et se confondent à certains endroits donc il y a des valeurs expérimentales qui sont égales aux valeurs prédites par nos modèles. Cette figure prouve qu'il y a une corrélation forte entre les températures de Munigi et de Mugara.

3° Histogramme

Considérons la répartition statistique des températures.

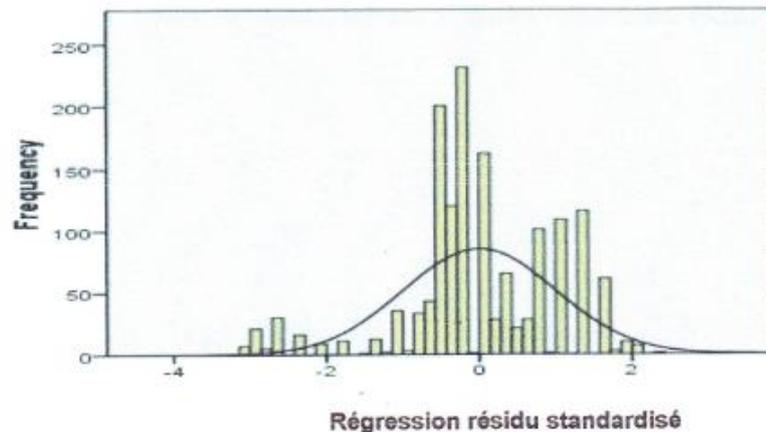


Figure 12- Histogramme et courbe normale superposés (var dépendante : Temp-Mugara)

La fréquence de la valeur moyenne est environ 170 (la valeur moyenne se répète plusieurs fois, environ 170 fois). La valeur modale (valeur plus grande) est aussi très proche de la moyenne : c'est la moyenne presque elle-même. La distribution (Figure 12) est alors très concentrée autour de la moyenne qui est de 34,54°C et est gaussienne.

4° Diagramme de régression

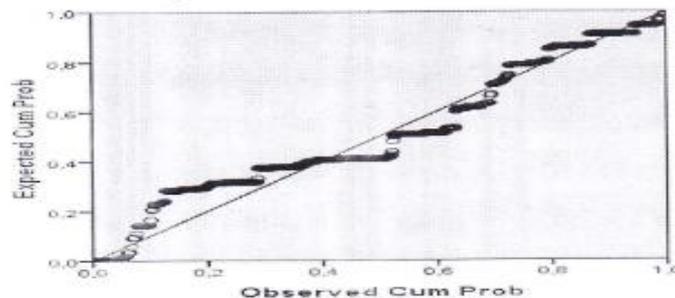


Figure 13- Diagramme de la droite de régression de résidu standardisé (var dépendante : Mugara)

Cette figure nous donne la droite de régression. La droite obtenue est linéaire, l'ajustement est alors linéaire. Les valeurs se présentent en dents de scie ou en escalier autour de la droite de régression.

V. Discussion Des Resultats

5.1 Corrélation entre les températures des fissures

1° De l'Analyse en Composantes principales et Classification Hiérarchisée

Partant de cette analyse et cette classification, nous constatons que :

- Les fissures de Munigi et Mugara sont très proches, elles s'influencent mutuellement.

La fissure de Nyiragongo cabanes se détache plus de deux autres ; leurs altitudes permettent de confirmer le résultat de cette classification : Munigi (1619m), Mugara (1749m) et Nyiragongo cabanes (3089m) et la figure de Géolocalisation des points de prélèvement (Figure 2) que nous avons élaboré le prouve.

- Dans l'activité de ce volcan, la fissure de Munigi contribue à 93,6%, celle de Mugara à 80,2% et celle de Nyiragongo cabanes à 35,57%.

2° Des corrélations

Les valeurs du coefficient de corrélation obtenues en utilisant la relation (2) et celles trouvées par application du logiciel SPSS (voir tableau 3) sont très proches à un seuil de signification inférieure à 5%, ceci prouve l'exactitude de nos calculs.

Nous remarquons que les températures de ces trois fissures sont en corrélation positive à de degré différent :

- Le coefficient de corrélation entre les fissures de Munigi et Mugara est de 87,3%, entre Mugara et Nyiragongo cabanes ce coefficient est de 46,4% et entre Nyiragongo cabanes et Munigi 22,8%. Le seuil de signification étant de 0%. Ces valeurs montrent que le coefficient de corrélation entre Munigi et Mugara est positive et proche de 1 (leurs températures sont fortement corrélées), tandis qu'entre Mugara et Nyiragongo cabanes ce coefficient est positive et de qualité moyenne (corrélation $\approx 0,5$) et entre Munigi et Nyiragongo cabanes la corrélation est positive de très mauvaise qualité (corrélation ≈ 0) leurs températures sont faiblement corrélées.

- En tenant compte du carré du coefficient de corrélation, on trouve qu'il y a 73,78% de liaison (et 26,22% d'aliénation) entre les températures dans les fissures de Munigi et de Mugara; c'est à dire que 73,78% de la variance de Mugara est attribuable à la variance de Munigi se trouva à basse altitude. De même \$ 21,16\% \$ de la variance de Nyiragongo cabanes est attribuable à la variance de Mugara et 5,24% de sa variance est attribuable à la variance de Munigi. Ceci prouve que la prédiction des températures dans les fissures donnerait un bon résultat entre Mugara et Munigi, qu'entre ces deux fissures avec Nyiragongo cabanes.

5.2 Modélisation des températures des fissures

1° De la prédiction des températures de la fissure Nyiragongo cabanes en fonction de celles de Munigi et Mugara

- L'équation de prédiction des températures de Nyiragongo cabanes en fonction de celles de Mugara seule est donnée par la relation : $Nyira^{\circ}C = 0,749 Mgr^{\circ}C - 1,218$ (9) avec un seuil de signification nul (sig=0%) pour le coefficient. Ce coefficient angulaire caractérise le phénomène, il indique que la température de Nyiragongo cabanes varie en moyenne de 74,9°C lorsque celle de Mugara varie de 100°C.

- La prédiction des températures de Nyiragongo cabanes en fonction de celles de Munigi et de Mugara est donnée par la relation $Nyira^{\circ}C = 10,039 - 1,449 Mng^{\circ}C + 1,794 Mgr^{\circ}C$ (10), relation dont le seuil de signification de ses constantes est nul. On a une équation de régression à deux variables.

En utilisant la méthode des multiplicateurs de Lagrange (des moindres carrés) on retrouve une équation à deux variables: $Nyira^{\circ}C_{Lagr} = 11,05263158 - 1,263157895 Mgr^{\circ}C + 1,6 Mng^{\circ}C$ (11).

Les deux équations à deux variables, (10) et (11), donnent les résultats avec un seuil de signification inférieur à 5% et leurs graphes présentent une même prédiction (graphes confondus, voir figure 8). Toutefois, le graphique des données expérimentales s'écarte pour certaines valeurs bien qu'ils ont même allure.

- L'équation de prédiction de Nyiragongo cabanes en fonction de Munigi seule est donnée par : $Nyira^{\circ}C = 10,188 + 0,446 Mng^{\circ}C$ (12). Les paramètres de cette droite de régression indiquent que la température de Nyiragongo cabanes varie en moyenne de 44,6°C lorsque celle de Munigi varie de 100°C. La valeur théorique de Nyiragongo cabanes est de 10,188°C lorsque la température de Munigi peut être égale à Zéro.

Les graphiques de données expérimentales et celles des valeurs estimées(modélisées) n'ont pas même allure pour ce cas (voir fig.9), la corrélation entre les températures de ces fissures étant aussi très faible et l'absence de liaison étant de 94,81%. Les températures de la fissure de Munigi seule ne permettent pas de prédire avec assurance celles de Nyiragongo cabanes, Munigi étant à 1470m de Nyiragongo cabanes.

Il y a lieu de considérer que les données expérimentales de la fissure Nyiragongo cabanes présentent une incertitude pour certaines valeurs mais aussi l'altitude entre les deux fissures étant très considérable.

2° De la prédiction des températures de Mugara en fonction de Munigi et Nyiragongocabanes

La modélisation des températures de Mugara nous fournit deux modèles :

- Le modèle 1 donne une équation en fonction des températures de Munigi seule :

$$Mgr^{\circ}C = 1,056 Mng^{\circ}C + 0,083 \quad (13)$$

- Le modèle 2 donne une équation en fonction des températures de Munigi et Nyiragongocabanes :

$$Mgr^{\circ}C = 1,056 Mng^{\circ}C + 0,173 Nyira^{\circ}C - 1,684 \quad (14)$$

Ces deux équations donnent des bons résultats (valeurs expérimentales égales aux valeurs estimées avec un seuil de signification inférieur à 5%), mais Nyiragongo cabanes est à haute altitude, il pourra se poser un problème d'accessibilité. Dans ce cas nous retenons la relation (13) donnant la prédiction de Mugara en fonction de la fissure Munigi seule étant donné que celle-ci se trouve à basse altitude et d'accessibilité facile.

3° De la prédiction des températures de Mugara en fonction des températures de Munigi

- La relation de prédiction obtenue à partir des coefficients non standardisés est:

$$Mgr^{\circ}C_{mod} = 1,056 Mng^{\circ}C - 0,186 \quad (15) \quad (sig = 0\%).$$

Les équations (13) et (15) ont même coefficient angulaire, les deux donnent une bonne pente de prédiction, et des équations fiables (sig= 0%). Ce paramètre indique qu'en moyenne la température de Mugara varie de 105,6°C lorsque celle de Munigi augmente de 100°C.

- L'équation de prédiction obtenue après calcul des coefficients *a* et *b*, est:

$$Mgr^{\circ}C = 1,066648733 Mgr^{\circ}C - 0,47895475 \quad (16) \quad (sig = 0\%),$$

qui nous donne le même résultat que ceux modélisés par les équations (13) et (15). Les graphiques générés à partir de ces équations sont confondus (fig.10 et fig. 11) pour les données modélisées et les données expérimentales(mesurées in situ). C'est pourquoi le graphique de couleur rouge est masqué par celui de couleur bleue (voir fig.1). Ces équations sont alors fiables et permettent la prédiction des températures de Munigi connaissant celles de Mugara. Nous remarquons aussi que lorsque le seuil de signification est inférieur à 5% la prédiction est meilleure.

4° Des Histogramme et diagramme de régression

La distribution obtenue est gaussienne, le coefficient de corrélation est explicable pour mesurer la relation entre nos variables ; la forme des nuages des points est par ailleurs parfaitement linéaire autour de la droite.

L'ajustement déterminé par la droite est le meilleur estimateur de la pente et de l'ordonnée à l'origine compte tenu de la quantité d'information contenue dans les points de mesure.

VI. Conclusion

Au vu des résultats de notre étude, nous tirons les conclusions suivantes :

- Les modèles mettent en évidence une forte corrélation entre les températures des fissures de Mugara et de Munigi, et une faible corrélation entre la fissure Nyiragongo cabanes et les deux autres.
- Les fissures de Mugara et Munigi sont les plus déterminantes dans l'activité du volcan Nyiragongo
- Connaissant les températures dans la fissure de Munigi se trouvant à basse altitude, on détermine par modélisation les températures dans la fissure de Mugara en utilisant les équations de régression établies.
- Les fissures à basse altitude contribuent plus à l'activité du volcan d'où la nécessité d'établir un modèle de suivi des températures dans ces fissures.
- Les résultats obtenus du modèle, les valeurs numériques comparées aux valeurs expérimentales et les graphiques obtenus, prouvent l'efficacité du modèle, la fiabilité des relations modélisées et des résultats à un seuil de signification inférieur à 5%

Nous pouvons alors affirmer que l'on peut modéliser les températures des fissures volcaniques, établir une corrélation entre les températures dans les fissures et prédire les températures dans les fissures se trouvant à haute altitude mais plus la hauteur séparant deux fissures est très grande plus le résultat de la modélisation n'est pas bon.

La confrontation des résultats calculés aux données expérimentales dans la fissure de Mugara en fonction de celles de Munigi, a donné une concordance satisfaisante, mais celles de Nyiragongo cabanes en fonction de celles de Mugara et celles de Munigi n'a pas donné une concordance satisfaisante, il y a lieu de considérer que les mesures expérimentales de la fissure Nyiragongo cabanes sont entachées d'erreurs mais cela peut être due au fait que plus la fissure est à très haute altitude.

Il serait mieux d'envisager le renforcement des méthodes de suivi de l'évolution de l'activité de ce volcan en utilisant les modèles numériques de calcul du flux de transfert de chaleur ou utiliser d'autres appareils (Caméra infrarouge) et ne pas se limiter seulement aux mesures de températures car ces températures mesurées peuvent être dues à la propagation de chaleur par convection dans les fissures.

Bibliographie

- [1]. Alain PAVE et Claudine SCHMIDT, (2008), *La modélisation au cœur de la démarche scientifique et à la confluence des disciplines*, article, Lyon.
- [2]. B. ABERRAHMANI et al. (2015), *Analyse et Modélisation des extrêmes de température au niveau de quelques stations types du Nord-Ouest Algérien*, article scientifique
- [3]. BAHAYA B. Siméon, (2013), *Modélisation des températures des fissures volcaniques et des données météorologiques autour du volcan Nyiragongo dans le Rift Est Africain*, Mémoire DEA, Faculté des sciences, Département de Physique, Université Pédagogique National (UPN), Kinshasa, RDCongo.
- [4]. Célestin MAHINDA, (2017), *L'éruption aura lieu sans qu'on sache quand*, dans journal le monde.
- [5]. Claude GRASLAND, (2000), *Cours d'initiation aux méthodes statistiques en Sciences sociales*, université, Paris VII
- [6]. Clément RAU, *Ajustement linéaire par les moindres carrés*, Université Paul Sabatier
- [7]. Cyril BONNEFOY, (2013), *Observation et modélisation spatiale de la température dans les terroirs viticoles du Val de Loire dans le contexte du changement climatique*, thèse de doctorat, Ecole Doctorale Sciences Humaines et Sociales, RENNES 2
- [8]. Éric GONCLAVES DA SIVER. (2011), *Méthode, Analyse et Calculs Numériques*, HAL, Archives ouvertes.
- [9]. KABASELE Yenga-Yenga, (2011), *Modélisation atmosphérique du temps Hélio-pluviométrique qu'il fait dans la ville de Kinshasa*, article, Numéro spécial, Vol1, IGC
- [10]. Michel DETAY, (2011), *Le Nyiragongo : Volcan de tous les dangers et maîtrise des risques*, article scientifique
- [11]. MOMBET V. (2011), *Modélisation des moyennes mensuelles de la température en France de 1991 à 2000*, Séries chronologiques.
- [12]. M. MORENO et O. ROUSTANT (2002), *Modélisation de la température : Application aux dérivées climatiques*, Article Scientifique.
- [13]. MUHINDO SYAVULISEMBO et al. (2016), *Volcan Nyiragongo : Evolution des impacts potentiels des coulées de laves volcaniques similaires à celle de 2002 sur la ville de Goma (RDCongo)*, Article Scientifique.
- [14]. OLIVIER Martin, (2007), *Introduction à la régression linéaire*, INRA, Avignon, France
- [15]. Olivier ROUSSAINT, (2006), *Modélisation statistique de la température pour la gestion des produits dérivés climatiques*, EMSE, ISFA, Sainte Etienne, Paris.
- [16]. R. JOURNEAUX, (1993), *La régression linéaire et ses conditions d'application*, article, Université de Paris XI
- [17]. SAMI Charfi, (2017), *Cartographie des températures à Tunis par modélisation statistique et télédétection*, article scientifique
- [18]. SIKA Sangare et al. (2006), *Modélisation et Analyse de quelques données de température du Programme Globe*, Université de Bamako
- [19]. <http://www.national.udppc.asso.fr>, consulté le 15 mars 2020
- [20]. <http://www.tel.archives-ouvertes.fr>, consulté le 20 avril 2020

BAHAYA BARHAHAMUKENYI Siméon, et. al. "Modelisation Des Temperatures Des Fissures Du Volcan Nyiragongo." *IOSR Journal of Applied Physics (IOSR-JAP)*, 12(4), 2020, pp. 04-19.