

Apport des méthodes statistiques multivariées à la caractérisation des processus métallogéniques à l'origine des anomalies lithogéochimiques en Sn, Au, Ag, Cu, Ta, Nb, et Ni au voisinage de la rivière Maiko, village Ubundji, territoire d'Ubundu, RDC

Elukesu Mbula Dimitri

Université de Kisangani, Kisangani, RDC

Makabu Kayembe Gabriel

Université de Lubumbashi, Lubumbashi, RDC

Jamal Abbach

Université Abdelmalek Essaaadi, Maroc

Katembo Kasekete Désiré

Université Officielle de Ruwenzori, Butembo, RDC

Doi: 10.19044/esipreprint.1.2026.p644

Approved: 26 January 2026

Posted: 28 January 2026

Copyright 2026 Author(s)

Under Creative Commons CC-BY 4.0

OPEN ACCESS

Cite As:

Elukesu, M.D., Makabu, K.G., Abbach, J. & Katembo, K.D. (2026). *Apport des méthodes statistiques multivariées à la caractérisation des processus métallogéniques à l'origine des anomalies lithogéochimiques en Sn, Au, Ag, Cu, Ta, Nb, et Ni au voisinage de la rivière Maiko, village Ubundji, territoire d'Ubundu, RDC*. ESI Preprints.

<https://doi.org/10.19044/esipreprint.1.2026.p644>

Résumé

Cette étude avalue l'apport des méthodes statistiques multivariées à la caractérisation des processus métallogéniques à l'origine des anomalies lithogéochimiques observée dans la région d'Ubundji à proximité de la rivière Maiko. Un total de 23 échantillons de roches prélevés sur le terrain a été analysé par fluorescence X (XRF) afin de déterminer les teneurs en Ta, Sn, Nb, Au, Ag, Cu, et Ni. Les analyses statistiques révèlent des corrélations fortes à très fortes entre Sn–Nb–Ta, traduisant un contrôle magmatique felsique différencié, tandis que l'or (plus ou moins l'Ag) montre une signature distincte, interprétée comme une empreinte hydrothermale. L'Analyse en composantes principales et le clustering K-means mettent en évidence trois groupes géochimiques correspondant respectivement à une

signature magmatique, une signature hydrothermale aurifère et un fond géochimique régional. Ces corrélations témoigneraient d'un système hydrothermal polymétallique possiblement associé à des intrusions granitiques différenciées, ainsi qu'une association secondaire avec le Cu et le Ni. Ces résultats permettent d'enrichir la compréhension du contexte métallogénique de la zone étudiée à travers notamment la confirmation de la présence d'anomalie géochimique positive en or et renforcent l'idée que la région d'Ubunji a une configuration géologique particulière comparativement à la géologie régionale qui est marquée par des processus sédimentaires. Son exploration approfondie permettrait à intégrer non seulement les données géochimiques, mais aussi pétrographiques, des analyses structurales et géophysiques afin de s'assurer de l'extension et la nature des zones minéralisées.

Mots clés : Anomalies lithogéochimiques, associations métalliques, statistiques multivariées, processus métallogénique, Village Ubundji, République Démocratique du Congo

Contribution of multivariate statistical methods to the characterisation of metallogenic processes responsible for lithogeochemical anomalies in Sn, Au, Ag, Cu, Ta, Nb, and Ni in the vicinity of the Maiko River, Ubundji village, Ubundu territory, DRC

Elukesu Mbula Dimitri

Université de Kisangani, Kisangani, RDC

Makabu Kayembe Gabriel

Université de Lubumbashi, Lubumbashi, RDC

Jamal Abbach

Université Abdelmalek Essaaadi, Maroc

Katembo Kasekete Désiré

Université Officielle de Ruwenzori, Butembo, RDC

Abstract

This study evaluates the contribution of multivariate statistical methods to the characterization of metallogenic processes responsible for lithogeochemical anomalies observed in the Ubundji area, near the Maiko River. A total of 23 rock samples collected in the field were analyzed by X-ray fluorescence (XRF) to determine the concentrations of Ta, Sn, Nb, Au, Ag, Cu, and Ni. Statistical analyses reveal strong to very strong correlations

among Sn–Nb–Ta, indicating control by differentiated felsic magmatism, whereas gold (\pm Ag) exhibits a distinct geochemical signature interpreted as reflecting a hydrothermal imprint. Principal component analysis (PCA) combined with K-means clustering highlights three geochemical groups corresponding respectively to a magmatic signature, a gold-bearing hydrothermal signature, and a regional geochemical background. These correlations suggest the presence of a polymetallic hydrothermal system potentially associated with differentiated granitic intrusions, with a secondary association involving Cu and Ni. The results contribute to a better understanding of the metallogenic framework of the study area, notably by confirming the presence of a positive gold geochemical anomaly, and support the interpretation that the Ubundji area displays a particular geological configuration compared to the surrounding region, which is largely dominated by sedimentary processes. Further exploration should therefore integrate not only geochemical data but also petrographic, structural, and geophysical analyses in order to better constrain the extent and nature of the mineralized zones.

Keywords: Lithogeochemical anomalies, metal associations, multivariate statistics, metallogenic processes, Ubundji Village, Democratic Republic of Congo

Introduction

Pour la majorité des campagnes d'exploration de territoires où les connaissances géologiques sont peu développées, la géochimie exerce une influence déterminante sur la nature et l'orientation des travaux de prospection subséquents. M'hammed et al. (1991) montrent que la géochimie permet de mettre en évidence la répartition des éléments chimiques et leur comportement dans les roches lors des processus géologiques. Bellehumer (1992), montre que l'objectif des telles études est d'arriver à reconnaître les phénomènes géologiques à l'origine des signaux géochimiques complexes et renseigner ainsi sur une existence probable d'un gisement. Dans son ouvrage *Using Geochemical Data: Evaluation, Presentation, Interpretation*, Rollinson (1993), insiste sur le fait que l'analyse multivariée doit être guidée par une hypothèse géologique claire, formulée à partir de données de terrain, de connaissances pétrologiques ou de contextes métallogéniques. Reimann et al. (2008) soulignent que l'usage de méthodes statistiques multivariées (comme l'ACP ou l'analyse factorielle) est peu fiable lorsque le nombre d'échantillons est inférieur à 30, sauf si le nombre de variables est également très réduit.

Dans la région d'Ubundje (province de la Tshopo, RDC), où les affleurements sont rares, les couches des sédiments sont épaisses et les

connaissances géologiques restent limitées, il est difficile de comprendre les processus à l'origine des anomalies lithogéochimiques et de déterminer leur lien avec des zones potentiellement minéralisées.

Dans ce contexte, la présente étude aimerait apprécier dans quelles mesure les méthodes statistiques multivariées permettent-elles d'expliquer et d'interpréter les modèle métallogénique à l'origine des anomalies lithogéochimiques de Sn, Ta, Nb, Ag, Au, Cu et Ni analysées dans les roches à Ubunji, village situé dans la cuvette centrale, une région encore peu documentée sur le plan géologique en raison de la rareté des affleurements.

Les Affleurement des roches observées à Ubunji, telles que des pegmatites, des granites, des diorites pourraient expliquer des processus géologiques favorables à une minéralisation polymétallique associée à un système d'hydrothermalisme.

Cette étude a pour objectifs de mettre en évidence les processus géologiques (modèle de mise en place) responsables des anomalies métalliques dans la région d'Ubundji (province de la Tshopo, RDC). Elle permet d'utiliser les données lithogéochimiques, de les analyser à l'aide des méthodes statistiques multivariées et d'interpréter les résultats afin de mettre en évidence les processus métallogénique à l'origines des anomalies métalliques.

Matériels et Méthodes

Milieu d'étude

Situation géographique de la zone d'étude

La zone faisant l'objet de la présente étude est située en grande partie dans la province de la Tshopo (Territoire d'Ubundu, village UBUNJE) et une partie se retrouve dans la province du Maniema (Figure 1).

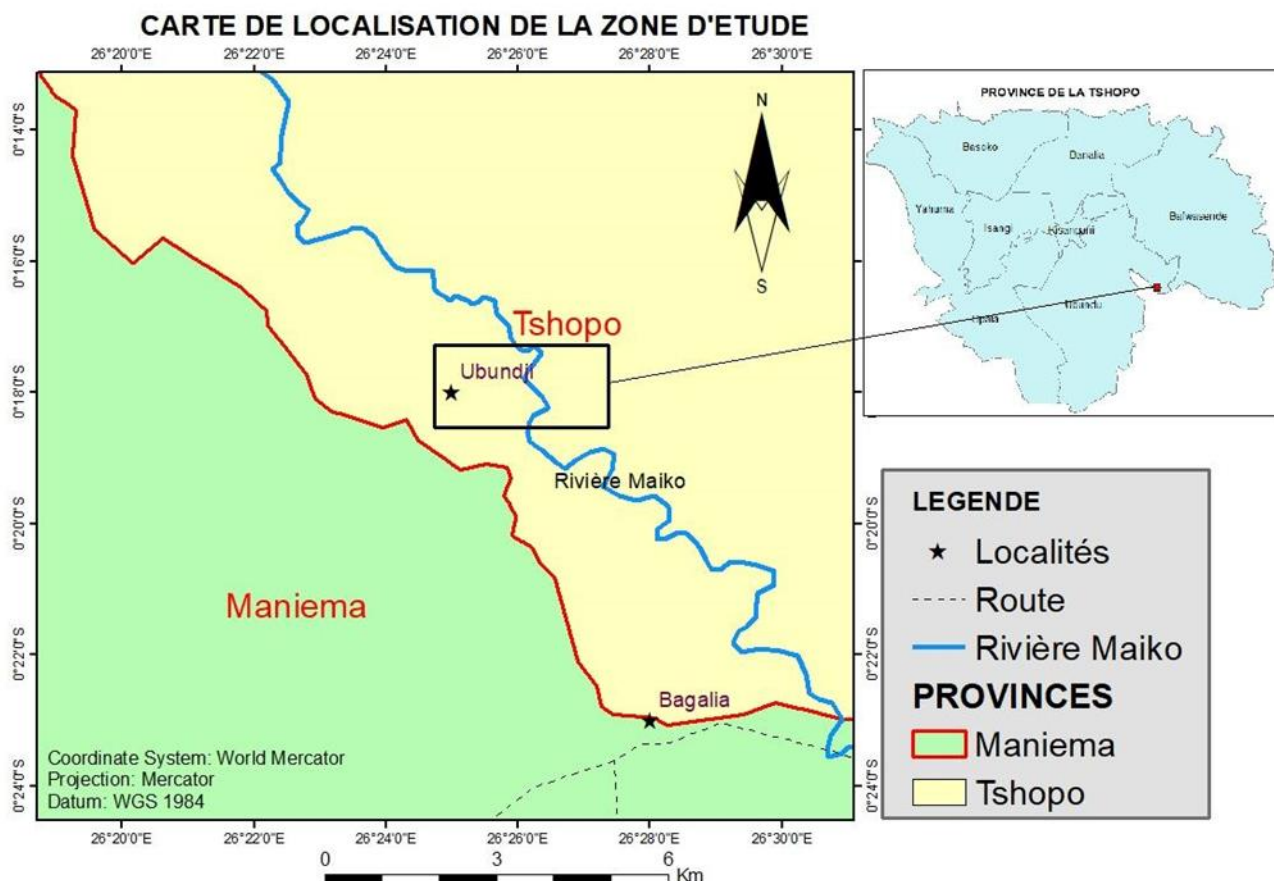


Figure 1: Carte géographique de la zone d'étude

Approche méthodologique

La démarche méthodologique adoptée combine la collecte et l'analyse de données géochimiques, l'utilisation de méthodes statistiques univariées et multivariées, ainsi que la représentation cartographique SIG en vue de l'interprétation géologique.

Recolte des données

Les données de terrain ont été collectées dans le village Ubundi (Territoire d'Ubundi, province de la Tshopo, RDC), près de la rivière Maiko. Pour retrouver facilement les affleurements des roches, nous avons choisi l'itinéraire suivant : les lits des rivières, des vallées encaissées, des zones en hauteur comme des collines, ainsi que des sites d'exploitation artisanale où des creuseurs ont déjà ouvert des puits à la recherche de minéraux utiles. Un total de 23 échantillons de roches (granitoïdes altérés, roches basiques, roches métasédimentaires, roches volcaniques, roches

altérées) ont été prélevés. Chaque échantillon, pesant environ 1 kg, a été collecté à l'aide d'un marteau géologique, puis emballé dans un sachet plastique étiqueté. Les coordonnées GPS, les observations sur la roche et son environnement ont été notées pour chaque prélèvement.

Analyses géochimiques des échantillons au laboratoire

Les 23 échantillons de roches prélevés sur le terrain ont été analysés par Fluorescence des Rayons X (notée XRF) au laboratoire du CRGM (Centre de recherche géologiques et minières). La technique XRF repose sur l'excitation des atomes par un rayonnement X primaire, induisant l'émission d'un rayonnement secondaire caractéristique de chaque élément, permettant ainsi une détermination rapide et non destructive des concentrations élémentaires (Beckhoff et al., 2006). Les échantillons ont été préalablement broyés et pressés en pastilles pour garantir l'homogénéité et la précision des mesures. Les éléments métalliques analysés étaient : Cu, Sn, Ni, Ag, Ta, Nb et Au. Les données obtenues ont été compilées dans une matrice (échantillons \times éléments) pour traitement.

Analyse des données

Statistique descriptive monovariable

Les travaux de Sinclair (1974) ont montré l'importance des outils de statistique descriptive pour détecter les anomalies dans les données géochimiques. Ainsi, pour chaque élément analysé, nous avons calculé:

- Moyenne, médiane, écart-type, min, max, coefficient de variation (CV),
- Distribution des fréquences (graphiques en histogrammes ou log-probabilité) selon Grunsky (2010), la détection des anomalies suit deux approches :
- Si la distribution est normale , le seuil correspond à la moyenne à laquelle on ajoute deux écart-types (moyenne + 2σ)
- Lorsqu'une distribution est de type lognormale, on procède à une transformation logarithmique puis on le seuil est déterminé à partir de la courbe des fréquences cumulées.
- Une règle pratique (souvent utilisée en géochimie) consiste à comparer la différence entre la moyenne et deux écarts-types ($M - 2\sigma$) :
- Si la différence entre la moyenne et deux écart-types reste positive, cela indique que la distribution est normale probable ($M - 2\sigma > 0$)
- Si la différence entre la moyenne et deux écarts-types est négative, la distribution est asymétrique c'est-à-dire on appliquera le log-transformation. (Si $M - 2\sigma < 0$).

Les caractéristiques d'enrichissement ou d'appauvrissement des éléments ont été évaluées par comparaison entre les teneurs moyennes des échantillons et les teneurs de référence crustale (Clarke values), selon la méthode décrite par Rollinson (1993). Un rapport $M/Clarke > 1$ indique un enrichissement, tandis qu'un rapport $M/Clarke < 1$ suggère un appauvrissement.

Statistique multivariable

Corrélation de Pearson

La corrélation linéaire est utilisée pour mesurer les relations entre éléments. Selon Garrett (1983), cette méthode est fiable si les données sont transformées ou standardisées, notamment dans les jeux à faible taille. Les corrélations permettent d'identifier des signatures géochimiques potentielles, à interpréter dans un cadre géologique. un seuil de significativité a été fixé à 95 % cela veut dire que toute corrélation dont $|r| \geq 0,413$ est considérée comme statistiquement significative (c'est-à-dire qu'elle n'est probablement pas due au hasard). La valeur f sert d'intervalle de progression pour classer la force de la corrélation. On part d'une valeur de référence $r_0 = 0.091$ (seuil minimal pris pour distinguer les corrélations très faibles) puis on ajoute des multiples de f . Valeur de f : 0,14675. (Davis, 2002 ; Rodgers et Nicewander, 1988).

Tableau 1 : Classification des coefficients de corrélation de Pearson selon leur intensité, basée sur la valeur seuil r_0 et f

Intervalle	Type de corrélation	Valeur de r
r_0 à $r_0 + f$	Faible	$0,091 < r \leq 0,318$
$r_0 + f$ à $r_0 + 2f$	Moyenne	$0,318 < r \leq 0,545$
$r_0 + 2f$ à $r_0 + 3f$	Forte	$0,545 < r \leq 0,772$
$r_0 + 3f$ à $r_0 + 4f$	Très forte	$0,772 < r \leq 1$

Analyse Factorielle / ACP

Ménard (1991) souligne que l'analyse factorielle permet une réduction de dimension des données tout en mettant en évidence les groupes d'éléments co-variants. Les axes factoriels représentent des regroupements (facteurs) souvent liés à des processus métallogéniques.

K-means clustering

D'après Carranza (2009), le K-means permet de regrouper les échantillons en clusters géochimiques homogènes. Cette technique est utile pour segmenter l'espace géologique selon des signatures multivariées, en complément de l'analyse factorielle.

Contexte Géologique

La géologie dans laquelle se trouve le terrain d'étude est représentée par le Lindien (Néoprotérozoïque). Cette unité dans la zone est représentée par les unités Lokoma et l'Aruwimi. Le Lindien est composé des sédiments peu ou pas métamorphisés qui reposent sur le substratum cristallin. En l'absence de fossiles, la stratigraphie des formations est entièrement basée sur la lithologie. L'échelle lithostratigraphique comprend trois grandes unités qui sont de haut en bas : L'Aruwimi, le Lokoma et l'Ituri (Verbeek, 1972). Celles-ci constituent les unités de base, caractérisées par une lithologie relativement homogène et susceptibles d'être cartographiées. Les limites des formations coïncident généralement avec des contacts lithologiques. Chaque faisceau comprend deux ou plusieurs formations, montrant une certaine parenté lithologique.. Le supergroupe de la Lindi est constitué principalement par les arkoses, grès, quartzites, shales et conglomérats (Verbeek, 1970).

Les renseignements relatifs à cette région sont presque inexistantes et en outre mal localisés. Henry (1923), qui l'a parcourue, y note à plusieurs endroits une discordance entre des grès, conglomérats et des calcaires. Ces roches appartiennent probablement les premières à l'Aruwimi et les secondes à la Lokoma. L'ensemble, qui repose sur le substratum cristallin affleurant localement, pourrait être plissé en une série de synclinaux et d'anticlinaux, dirigés E-W à NW-SE. Dans la fenêtre de Wanie-Rukula, Sluys (1967) a observé des blocs du substratum cristallin encadrés de failles et en contact avec les formations de la Lokoma.

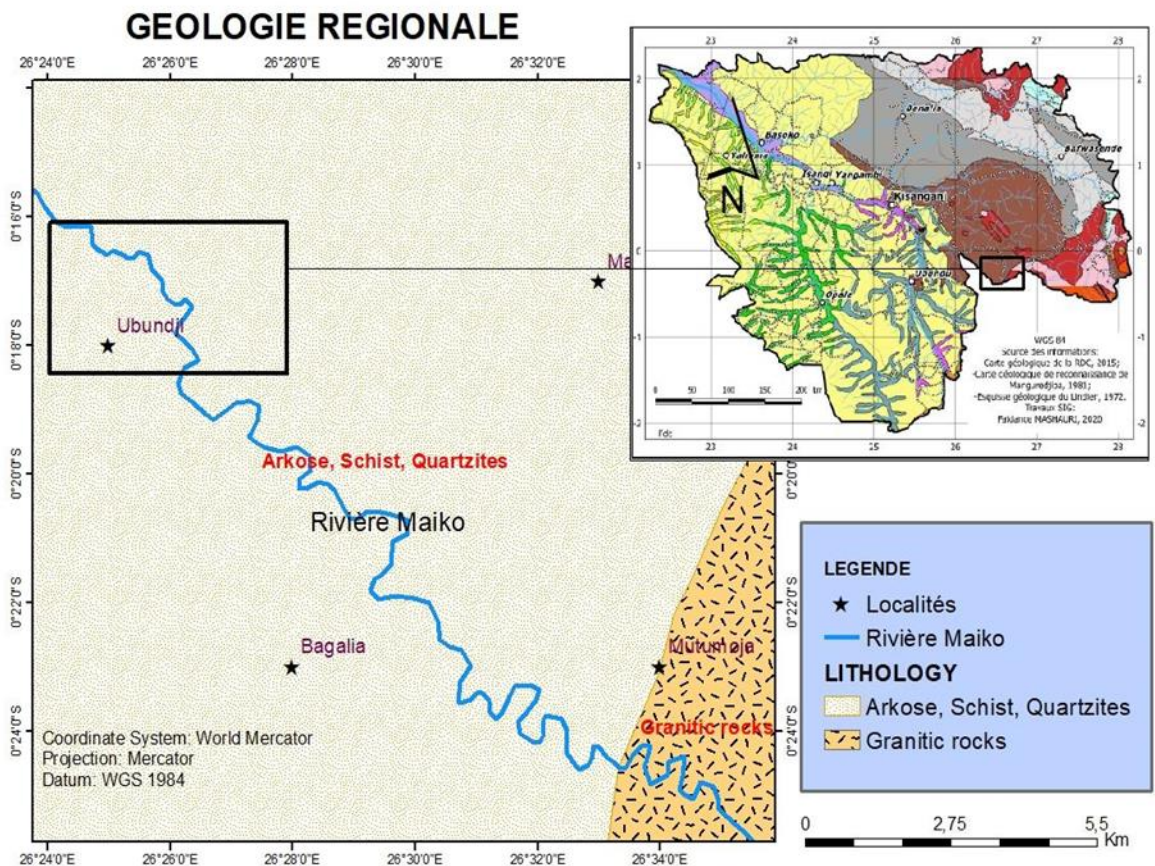


Figure 2 : Carte géologique de la région , extrait de la carte géologique de la RDC

Resultats

Données géochimiques

Les données issues de l'analyse géochimique des roches sont présentées en annexe.

Résultats obtenus de la statistique descriptive

Paramètre statistique des éléments chimiques et Normalisation des teneurs

Le tableau Tableau 2 présente les paramètres statistiques des 7 éléments chimiques analysés dans la zone d'étude et le rapport de normalisation de la teneur moyenne par rapport au Clarke respectif de chaque élément.

Les moyennes de tous les éléments chimiques sont supérieures à leurs valeurs médianes. Ceci indique que la distribution des teneurs est asymétrique à droite.

Un seul élément, notamment l'or, montre un enrichissement dans les échantillons analysés.

Les autres éléments, à savoir : Sn, Ta, Nb, Cu, Ag et Ni présentent un appauvrissement.

Tableau 2: Paramètre statistique des éléments chimiques
(en ppm sauf pour le rapport M/Clark)

Elem/stat	Min	Max	Moyenne (M)	Médiane	Écart-type	Clarke	M/clarke
Cu	0,001	1,25	0,2793	0,04	0,0775	55	0,005
Sn	0,001	5	0,8915	0,04	0,2934	2	0,445
Ni	0,001	0,03	0,0071	0,003	0,00156	75	0,000094
Ag	0,001	0,33	0,0316	0,002	0,0196	0,1	0,316
Nb	0,001	4	0,6346	0,14	0,2379	20	0,032
Ta	0,001	1,11	0,2634	0,07	0,0844	2	0,132
Au	0,01	2,25	0,73	0,7	0,1193	0,005	146

Distribution des éléments chimiques

Le tableau 3 ci-après donne un aperçu sur les distributions de chaque élément chimique. Il indique que tous les éléments chimiques suivent une distribution lognormale.

Tableau 3 : Distribution des éléments chimiques

Élément	Moyenne(M)	Écart-type(S0)	M-2S0	Distribution
Cu	0,28	0,37	-0,46	lognormale
Sn	0,89	1,41	-1,93	lognormale
Ni	0,007	0,007	-0,007	lognormale
Ag	0,032	0,094	-0,156	lognormale
Nb	0,64	1,14	-1,64	lognormale
Ta	0,26	0,41	-0,56	lognormale
Au	0,73	0,57	-0,41	lognormale

Détermination du seuil d'anomalie pour les éléments

Le seuil d'anomalie pour les éléments qui suivent une distribution lognormale est déterminé par la courbe des fréquences cumulées (Graphe a). Ce graphe montre la courbe de fréquence cumulée ou courbe de répartition empirique de l'élément chimique Au.

Le seuil d'anomalie est ici déterminé par la valeur de l'abscisse x correspondant au quartile 75%. Le seuil d'anomalie de l'élément Au est donc la valeur 1,035 g/Tonne.

Le tableau 4 présente les résultats de calcul du seuil d'anomalie pour tous les éléments (Au, Sn, Ta, Nb, Cu, Ag et Ni.)

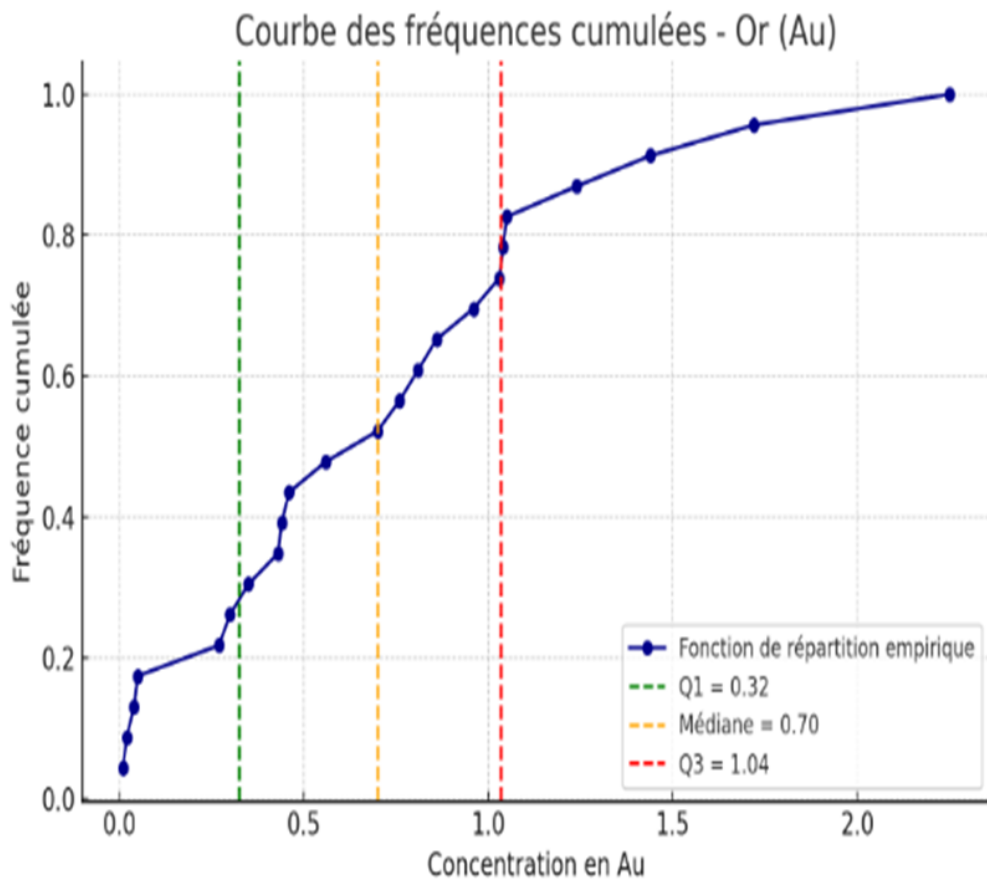


Tableau 4 : Seuils d'anomalie
(calculés à partir du 3^e quartile, Q3) pour chacun des éléments

Élément	Q1 (25%)	Médiane (Q2)	Q3 (75%)	Seuil d'anomalie (\geq Q3)
Cu	0,015	0,040	0,435	0,435
Sn	0,020	0,040	1,010	1,010
Ni	0,002	0,003	0,010	0,010
Ag	0,001	0,002	0,007	0,007
Nb	0,040	0,140	0,360	0,360
Ta	0,025	0,070	0,155	0,155
Au	0,325	0,700	1,035	1,035

Cartographie des anomalies géochimiques pour chacun des éléments

Les cartes des anomalies géochimiques pour chacun des éléments (Cu, Sn, Ni, Ag, Nb, Ta, Au ; **(Figure 2 en annexe)** indique que les points rouges représentent des échantillons à anomalie positive (valeurs supérieures ou égales au seuil Q3). Les points bleus représentent des échantillons normaux ou négatives (valeurs inférieures au seuil Q3).

Résultat de la statistique multivariable

Coefficient de corrélation de Pearson

La matrice de corrélation (Figure 3), met en évidence une association très forte entre Sn, Nb et Ta ($r > 0,88$), traduisant un contrôle magmatique felsique différencié. L'or présente des corrélations modérées avec ces éléments, suggérant une origine composite impliquant une remobilisation hydrothermale. Le Cu et Ni montrent des relations plus faibles avec le groupe Sn–Nb–Ta, indiquant une signature géochimique indépendante, probablement liée à des influences lithologiques distinctes. Ces relations confirment la superposition de processus magmatiques et hydrothermaux dans la genèse des anomalies géochimiques étudiées.

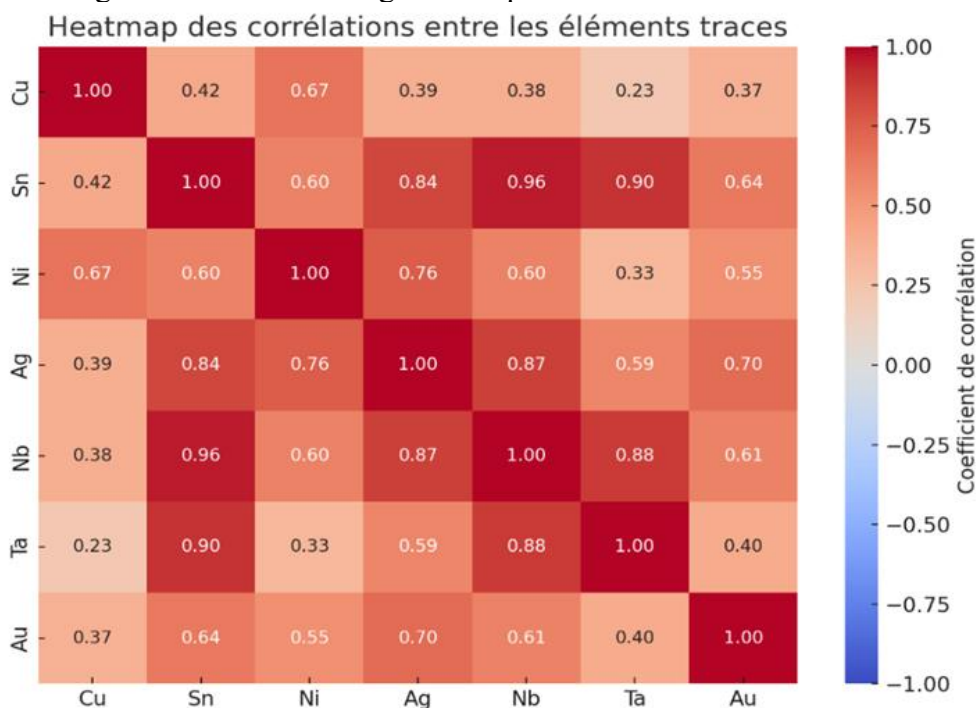


Figure 3 : Carte thermique des coefficients de corrélation de Pearson entre Cu, Sn, Ni, Ag, Nb, Ta, Au), Reimann, C. et al.. (2008)

La corrélation entre les axes factoriels (ACP) et les éléments chimiques

L'Analyse en composantes principales (Figure 4), met en évidence deux axes majeurs contrôlant la variabilité géochimique. L'axe F1, dominé par Sn, Nb et Ta, traduit un processus magmatique felsique différencié, tandis que l'axe F2, dominé par Au \pm Ag, reflète une empreinte hydrothermale distincte. La projection des échantillons révèle trois groupes correspondant respectivement à une signature magmatique, une signature hydrothermale et au fond géochimique régional. Ces résultats confirment la

superposition de processus magmatiques et hydrothermaux dans la genèse des anomalies géochimiques étudiées.

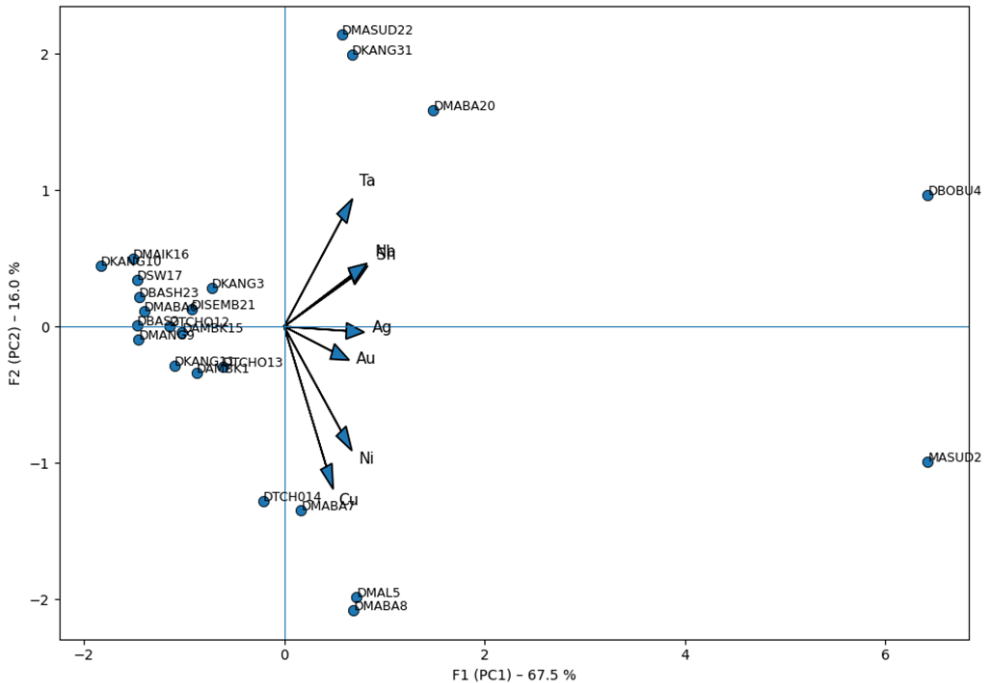


Figure 4 : ACP Biplot F1 et F2 (variables et échantillons)

Tableau 5 : Valeur de corrélation entre les axes factoriels

Élément	Corrélation F1	Corrélation F2
Cu	+0.258	-0.628
Sn	+0.439	+0.234
Ni	+0.356	-0.480
Ag	+0.421	-0.022
Nb	+0.436	+0.244
Ta	+0.360	+0.493
Au	+0.342	-0.130

Regroupements géochimiques issus du K-means

Le regroupement des échantillons par la méthode K-means a permis de mettre en évidence trois clusters géochimiques distincts. Le premier cluster est caractérisé par des teneurs élevées en Sn, Nb et Ta, traduisant un contrôle magmatique felsique différencié (échantillons DBOBU4, MASUD2, DMABA20, DKANG31, DMASUD22, DMAL5, DMABA7, DMABA8, DTCH014, DKANG3 et DTCH013). Le second cluster est dominé par l'or (\pm Ag) et reflète une empreinte hydrothermale responsable de la redistribution de l'or (échantillons DISEMB21, DAMBK15, DTCH012 et DAMBK1). Le troisième cluster correspond au fond géochimique régional, peu affecté par les processus métallogéniques (DBAS2, DMANG9,

DKANG10, DKANG11, DBASH23, DMAIK16, DSW17 et DMABA6). La cohérence entre les résultats du K-means, de l'ACP et de la matrice de corrélation confirme la superposition de processus magmatiques et hydrothermaux dans la zone étudiée.

Carte conceptuelle (Processus , regroupement géochimique et géologie)

Cette approche intégrée démontre l'apport fondamental des méthodes statistiques multivariées dans la compréhension des processus géologiques à l'origine des anomalies lithogéochimiques, au-delà de toute simple évaluation de potentiel minier.

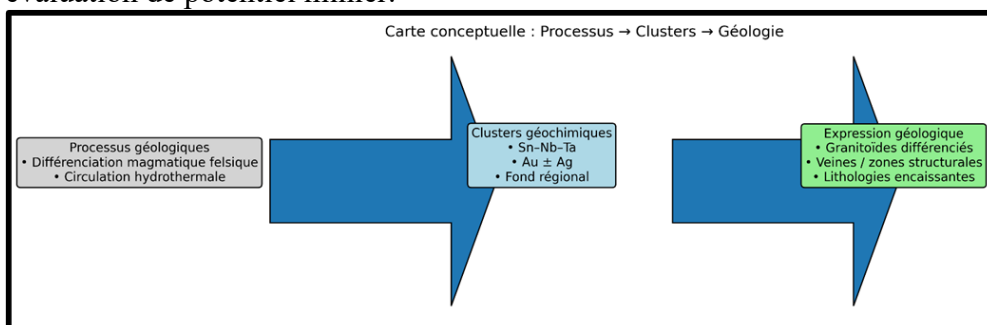


Figure 5 : Carte conceptuelle de processus géologique, regroupement géochimique et géologie

Discussion des résultats

Les résultats obtenus par les méthodes statistiques multivariées appliquées aux données géochimiques mettent en évidence une structuration claire des teneurs en éléments métalliques dans la région d'étude, révélant des signatures minéralogiques potentiellement liées à des systèmes hydrothermaux riches en métaux précieux et critiques.

Distributions et anomalies géochimiques

Les analyses monovariées ont montré que tous les éléments étudiés suivent une distribution lognormale, ce qui est courant dans les milieux géochimiques naturels en contexte minier (Ahrens, 1954 ; Reimann & Filzmoser, 2000 ; Davis, 2002).

L'or (Au), dont la moyenne est largement supérieure à son Clarke ($M/Clarke = 146$), indique un fort enrichissement dans les roches locales, suggérant une source minéralisée non négligeable. Lavreau, J. (1984) dans son étude intitulée : le géosynclinal de l'Ituri (NE-Zaïre) et son évolution géodynamique, met en évidence des enrichissements très importants en or dans les formations du Kibalien, avec des rapports $M/Clarke$ supérieurs à 100 dans certaines zones aurifères. Des enrichissements aurifères très élevés ont également été rapportés dans plusieurs provinces précambriennes africaines, notamment dans des ceintures de roches vertes, où ils sont

associés à des circulations hydrothermales structurées (Milesi et al., 1992 ; Pirajno, 2009)

Corrélations géochimiques

La matrice de corrélation de Pearson montre des associations très fortes entre Sn–Nb, Sn–Ta, Nb–Ta, Sn–Ag et Ag–Nb. Les résultats rejoignent les observations rapportées dans la littérature. Ainsi, plusieurs travaux décrivent l'association Sn–Nb–Ta dans les pegmatites et les granites différenciés (Černý, 1991 ; London, 2008 ; Pollard, 1989). L'intégration de l'argent (Ag) dans ces corrélations a également été signalée dans des systèmes hydrothermaux polymétalliques (Pirajno, 2009 ; Heinrich, 2005), et confirmée dans différents contextes africains, notamment au Kibalien en RDC (Lavreau, 1984) et en Afrique de l'Ouest (Milesi et al., 1992).

Clemens et al. (2018) ont quant à eux démontré que les minéralisations de type Sn–Nb–Ta peuvent être mises en évidence par des signatures géochimiques multivariées dans les granites tardi-tectoniques, ce qui renforce notre hypothèse d'un contexte granitique différencié dans la zone d'étude.

Par ailleurs, les corrélations mises en évidence entre l'or et l'argent ($r = 0,701$), ainsi qu'entre l'or et l'étain ($r = 0,642$), traduisent des associations géochimiques significatives. L'association Au–Ag est largement documentée dans les systèmes hydrothermaux polymétalliques, où ces deux métaux précipitent fréquemment ensemble en raison de leur affinité commune pour les sulfures et les solutions hydrothermales sulfurées. Heinrich (2005) et Pirajno (2009) soulignent que l'or et l'argent se concentrent souvent conjointement dans les fluides magmato-hydrothermaux liés aux intrusions granitiques différenciées. Dans le contexte africain, Lavreau (1984) a également observé cette association au sein des formations du Kibalien en RDC, et Milesi et al. (1992) l'ont rapportée dans plusieurs ceintures de roches vertes aurifères d'Afrique de l'Ouest.

L'association étroite Sn–Nb–Ta observée dans les données multivariées est typique des systèmes felsiques différenciés bien documentés dans les provinces kibariennes, où ces éléments incompatibles se concentrent dans les phases tardives des magmas granitiques et dans les systèmes pegmatitiques associés. L'organisation géochimique observée à Ubundji suggère ainsi un modèle composite, combinant un héritage magmatique felsique différencié et une redistribution hydrothermale ultérieure, dans un contexte géologique dominé par des formations sédimentaires.. (Cahen et al., 1984 ; Pohl, 1994 ; Černý, 1991 ; Tack et al., 2010).

Analyse factorielle et clustering géochimique

L'analyse en composantes principales met clairement en évidence deux tendances majeures. Le premier facteur (F1), fortement contrôlé par l'étain, le niobium, le tantale, l'argent et l'or, illustre la signature métallogénique dominante de la zone. Ce regroupement d'éléments est caractéristique des environnements où interviennent des apports magmatiques différenciés, favorisant la mise en place de minéralisations filoniennes polymétalliques.

Le second facteur (F2) traduit une opposition marquée entre le cuivre et les autres éléments. Cette relation suggère que le cuivre ne partage pas le même comportement que les métaux associés au F1, ce qui peut indiquer soit des épisodes de minéralisation distincts, soit des compartiments lithologiques et structuraux différents.

Conclusion

Cette étude lithogéochimique menée dans la région d'Ubundji, au voisinage de la rivière Maiko, a permis de mettre en évidence une structuration géochimique nette des éléments métalliques analysés, révélant des signatures cohérentes avec la superposition de plusieurs processus géologiques et métallogéniques. Les distributions asymétriques des teneurs, les corrélations inter-élémentaires et les résultats des analyses statistiques multivariées témoignent d'un système géochimique non homogène, contrôlé à la fois par un héritage magmatique felsique différencié et par des processus hydrothermaux ultérieurs.

L'association étroite Sn–Nb–Ta, clairement identifiée par la matrice de corrélation, l'analyse en composantes principales et le clustering, constitue un marqueur robuste de différenciation magmatique avancée, typique des environnements granitiques et pegmatitiques enrichis en éléments incompatibles. Cette signature suggère l'intervention de magmas felsiques évolués, dont les phases tardives ont favorisé la concentration de ces éléments dans les roches encaissantes. Par ailleurs, le comportement distinct de l'or, souvent associé à l'argent mais partiellement dissocié du groupe Sn–Nb–Ta, indique une redistribution secondaire contrôlée par des fluides hydrothermaux, probablement canalisés par des structures favorables à la circulation des fluides.

La mise en évidence de trois groupes géochimiques bien individualisés souligne la complexité du système étudié et confirme que les anomalies lithogéochimiques observées ne résultent pas d'un processus unique. Cette organisation spatiale et géochimique reflète un modèle composite dans lequel des apports magmatiques différenciés sont partiellement remobilisés et reconfigurés par des épisodes hydrothermaux postérieurs.

Au-delà des résultats locaux, cette étude met en évidence l'apport fondamental des méthodes statistiques multivariées comme outils d'aide à la compréhension des processus géologiques complexes, en particulier dans les régions à faible densité d'affleurements. L'intégration de la géochimie des roches avec les approches statistiques et l'interprétation géologique constitue ainsi une démarche pertinente pour décrypter l'origine et l'évolution des anomalies métalliques. Les travaux futurs gagneraient à intégrer des données pétrographiques détaillées, des analyses structurales et des investigations géophysiques afin de mieux contraindre la géométrie, la chronologie et les mécanismes de mise en place des systèmes minéralisés reconnus dans la région d'Ubundji.

Conflit d'intérêts : Les auteurs n'ont signalé aucun conflit d'intérêts.

Disponibilité des données : Toutes les données sont incluses dans le contenu de l'article.

Déclaration de financement : Les auteurs n'ont obtenu aucun financement pour cette recherche.

References:

1. Ahrens, L.H., 1954. The lognormal distribution of the elements: A fundamental law of geochemistry and its subsidiary. *Geochimica et Cosmochimica Acta* 5(2), 49–73. [https://doi.org/10.1016/0016-7037\(54\)90038-2](https://doi.org/10.1016/0016-7037(54)90038-2)
2. Beckhoff, B., Kanngießer, B., Langhoff, N., Wedell, R., Wolff, H. (Eds.), 2006. *Handbook of Practical X-Ray Fluorescence Analysis*. Springer, Berlin–Heidelberg.
3. Bonham-Carter, G.F., 1994. *Geographic Information Systems for Geoscientists: Modelling with GIS*. Pergamon Press, Oxford.
4. Cahen, L., Snelling, N.J., Delhal, J., Vail, J.R., 1984. *The Geochronology and Evolution of Africa*. Oxford University Press.
5. Carranza, E.J.M., 2009. *Geochemical Anomaly and Mineral Prospectivity Mapping in GIS*. Elsevier, Amsterdam.
6. Černý, P., 1991. Rare-element granitic pegmatites. Part I: Anatomy and internal evolution of pegmatite deposits. *Geoscience Canada* 18(2), 49–67.
7. Clemens, J.D., Petford, N., Mawer, C.K., 2018. Rare-metal mineralization in evolved granites: A geochemical approach to targeting Sn–Nb–Ta systems. *Ore Geology Reviews* 95, 105–124.
8. Davis, J.C., 2002. *Statistics and Data Analysis in Geology*, 3rd ed. John Wiley & Sons, New York.

9. Garrett, R.G., 1983. The robust multivariate statistical analysis of geochemical data. *Journal of Geochemical Exploration* 20(1), 183–198.
10. Govindaraju, K., 1994. Compilation of working values and sample description for 383 geostandards. *Geostandards Newsletter* 18(S1), 1–158.
11. Grunsky, E.C., 2010. The interpretation of geochemical survey data. *Geochemistry: Exploration, Environment, Analysis* 10(1), 27–74.
12. Heinrich, C.A., 2005. The physical and chemical evolution of low-salinity magmatic fluids in porphyry environments. *Economic Geology* 100(5), 1061–1081.
13. Lavreau, J., 1984. Le Kibalien du Nord-Est du Zaïre : géologie et métallogénie aurifère. *Bulletin du Musée Royal de l'Afrique Centrale (MRAC), Sciences de la Terre, Tervuren*.
14. Levinson, A.A., 1974. *Introduction to Exploration Geochemistry*. Applied Publishing Ltd., Calgary.
15. Ménard, J.-J., 1991. *Statistique multivariée appliquée à la géologie*. Éditions Technip, Paris.
16. Milesi, J.P., Ledru, P., Feybesse, J.L., Dommange, A., Marcoux, E., 1992. Early Proterozoic ore deposits and tectonics of the Birimian orogenic belt, West Africa. *Precambrian Research* 58, 305–344.
17. Pirajno, F., 2009. *Hydrothermal Processes and Mineral Systems*. Springer, Berlin–Heidelberg.
18. Pohl, W., 1994. Metallogeny of the Central African Kibaran Belt. *Schweizerische Mineralogische and Petrographische Mitteilungen* 74, 415–432.
19. Pollard, P.J., 1989. Geochemistry of granites associated with tin and tungsten mineralization. In: Whitney, J.A., Naldrett, A.J. (Eds.), *Ore Deposit Models, Vol. 1*, Geoscience Canada Reprint Series, pp. 174–207.
20. Reimann, C., Filzmoser, P., Garrett, R.G., Dutter, R., 2008. *Statistical Data Analysis Explained: Applied Environmental Statistics with R*. Wiley-VCH, Weinheim.
21. Rodgers, J.L., Nicewander, W.A., 1988. Thirteen ways to look at the correlation coefficient. *The American Statistician* 42(1), 59–66.
22. Rollinson, H.R., 1993. *Using Geochemical Data: Evaluation, Presentation, Interpretation*. Longman Scientific & Technical, London.
23. Sinclair, A.J., 1974. Selection of threshold values in geochemical data using probability graphs. *Journal of Geochemical Exploration* 3(2), 129–149.

24. Sluys, M., 1967. La fenêtre tectonique de Wanie-Rukula et ses implications géologiques. *Bulletin de la Société belge de Géologie, de Paléontologie et d'Hydrologie* 75(2), 221–242.
25. Tack, L., Wingate, M.T.D., Liégeois, J.-P., Fernandez-Alonso, M., Deblond, A., 2010. The Kibaran belt of Central Africa: A Proterozoic accretionary belt. *Precambrian Research* 180, 63–91.
26. Verbeek, T., 1970. Géologie et lithologie du Lindien (Précambrien supérieur du nord du Zaïre). *Annales du Musée Royal de l'Afrique Centrale, Sciences géologiques*, n°66, 311 p.
27. Verbeek, T., 1972. Carte géologique de la République du Zaïre au 1:2 000 000 et notice explicative. Musée Royal de l'Afrique Centrale, Tervuren.

Appendix

Tableau: Données géochimiques (ppm)

N°Echant	Cu	Sn	Ni	Ag	Nb	Ta	Au
1	0,02	0,04	0,01	0,008	0,02	0,01	0,76
2	0,002	0,001	0,008	0,002	0,04	0,02	0,01
3	0,04	1	0,002	0,01	0,06	0,03	1,05
4	0,43	5	0,02	0,33	4	1,11	2,25
5	1,25	1,02	0,01	0,01	0,46	0,2	0,86
6	0,21	0,002	0,001	0,002	0,024	0,09	0,35
7	0,75	0,77	0,01	0,007	0,24	0,11	0,96
8	0,78	0,7	0,02	0,006	0,24	0,11	1,03
9	0,04	0,01	0,008	0,002	0,001	0,001	0,04
10	0,001	0,001	0,001	0,001	0,01	0,008	0,02
11	0,26	0,04	0,008	0,001	0,26	0,1	0,05
12	0,14	0,03	0,002	0,001	0,07	0,03	0,81
13	0,04	0,08	0,008	0,003	0,14	0,03	1,24
14	0,74	0,7	0,01	0,006	0,23	0,07	0,46
15	0,18	0,04	0,001	0,001	0,06	0,04	1,04
16	0,01	0,001	0,001	0,001	0,21	0,08	0,3
17	0,01	0,02	0,003	0,001	0,14	0,06	0,27
18	0,44	2,26	0,003	0,001	2,46	1	0,56
19	0,01	0,04	0,001	0,001	0,04	0,02	1,44
20	0,03	2,24	0,002	0,001	1,14	1,03	0,43
21	0,01	0,02	0,003	0,001	0,04	0,01	0,44
22	0,03	2,24	0,002	0,001	1,15	0,96	0,7
23	1	4,25	0,03	0,33	3,56	0,94	1,72