Afrique SCIENCE *20(1) (2022) 41 - 55*
ISSN 1813-548X, http://www.afriquescience.net

Analyse du choix de la méthode de krigeage pour l'estimation des ressources des gîtes aurifères du socle Paléoprotérozoïque du Burkina Faso

Ernest G. OUEDRAOGO [1, 2*], Nicolas KAGAMBEGA [1,2], G. Hubert ZONGO [1,2], Madi OUEDRAOGO [1,2], Séta NABA [2] et Martin LOMPO [2]

[1] Université Joseph Ki-ZERBO, Département des Sciences de la Terre, Laboratoire Géosciences et Environnement, 03 BP 7021 Ouagadougou 03, Burkina Faso
[2] Université de Fada N'Gourma, Ecole Supérieure d'Ingénierie, Département de Génie Minier, BP 54 Fada N'Gourma, Burkina Faso

(Reçu le 06 Septembre 2021 ; Accepté le 30 Décembre 2021)

* Correspondance, courriel : *gernestoue@yahoo.fr*

Résumé

Dans cette étude, le but est de déterminer les paramètres essentiels pouvant guider au choix du type de krigeage approprié pour l'estimation des gîtes aurifères du socle Paléoprotérozoïque du Burkina Faso. Pour cela, plusieurs analyses statistiques prenant en compte les influences de la délimitation en domaines, du plafonnement des teneurs extrêmes et de la variation de la taille des composites ont été effectuées à travers les logiciels GEOVIA Surpac et IBM SPSS Statistics sur les teneurs moyennes en or réparties en zones et en domaines minéralisés et collectées sur deux gîtes aurifères du pays. Il ressort de cette étude que ces approches sont nécessaires pour l'évaluation minière et contribuent à la réduction de la variabilité spatiale de la minéralisation. Aussi, le coefficient de variation, la courbe de distribution de probabilité et le coefficient d'asymétrie demeurent les paramètres clés pour un choix judicieux de la méthode de krigeage. Ainsi, pour des gîtes présentant une distribution symétrique à faiblement asymétrique avec un faible coefficient de variation, le krigeage ordinaire peut fournir de bons résultats. Alors que le krigeage à multiples indicateurs est adapté pour l'estimation des gîtes montrant une distribution asymétrique avec un fort coefficient de variation. Cette étude vient montrer davantage que la statistique classique reste un outil indispensable dans le processus de l'évaluation minière.

Mots-clés : *Krigeage, gîte aurifère, domaine homogène, composite, haute teneur.*

Abstract

Analysis of the choice of kriging method for Burkina Faso Paleoproterozoic gold deposit resource estimation

In this study, the aim is to determine the essential parameters that can guide the choice of the appropriate kriging method for Burkina Faso Paleoproterozoic gold deposit resource estimation. For this, several statistical analyses taking into account the influences of domain delimitation, outliers cupping and composite

size variation were carried out through GEOVIA Surpac and IBM SPSS Statistics software on average gold grades divided into zones and mineralized domains and collected on two gold deposits in the country. This study shows that these approaches are necessary for mine assessment and contribute to the reduction of spatial variability in mineralization. The coefficient of variation, the probability distribution curve and the skewness also remain the key parameters for a judicious choice of the kriging method. Thus, for deposits showing a symmetrical to low asymmetric distribution with a low coefficient of variation, ordinary kriging can provide good results. While multiple indicator kriging is suitable for estimating deposits showing an asymmetric distribution with a high coefficient of variation. This study further shows that classical statistics remain an indispensable tool in the mining evaluation process.

Keywords : *kriging, gold deposit, homogeneous domain, composite, outlier*.

1. Introduction

Le socle paléoprotérozoïque du Burkina Faso regorge d'importants potentiels métallifères avec en 2020, 14 mines en production dont une mine de zinc. Depuis 2009, l'or est devenu le premier produit d'exportation devant le coton. Ces différents dépôts sont décrits comme des minéralisations filoniennes montrant généralement de fortes teneurs en or et des minéralisations disséminées dans l'encaissant et présentant des teneurs relativement faibles [1, 2]. En général, il s'agit de gîtes épigénétiques de type orogénique [2 - 4] liés aux zones de cisaillement et encaissés dans tous les types de lithologie qui sont affectées d'un métamorphisme régional de faciès schistes verts. La minéralisation est piégée au sein des veines de quartz généralement déformées et présente une distribution erratique. Des gisements similaires ont été reconnus dans le reste du socle paléoprotérozoïque de l'Afrique de l'Ouest [5, 6] et à travers le monde [7]. En général, ces gîtes présentent un excès d'échantillons à faible teneur et quelques échantillons avec des teneurs extrêmes. Cela se traduit statistiquement par une distribution non symétrique, mais plutôt biaisée vers la droite comme la plupart des gîtes minéraux [8, 9]. De ce fait, ce sont les gîtes les plus difficiles à estimer [10]. Par ailleurs, il est unanimement admis que les méthodes géostatistiques, connues sous l'appellation « krigeage » sont celles qui fournissent de meilleurs résultats quant à l'estimation des ressources minérales de tels gîtes [11, 12]. Depuis leur avènement dès 1963, elles ont connu une fulgurante évolution et se résument à la géostatistique linéaire avec les méthodes comme les krigeages ordinaire et simple, la géostatistique non-linéaire tel que le krigeage d'indicatrices et ses variantes et enfin les simulations.

Parmi ces multiples formes de krigeage proposées par les géostatisticiens, le krigeage ordinaire et le krigeage à indicateurs multiples, variante du krigeage d'indicatrices, sont les plus utilisées [11 - 13]. Les méthodes sont présentées en détail [14, 15]. Au Burkina Faso, la quasi-totalité des gîtes aurifères sont évaluées par l'application de l'une ou de l'autre de ces deux approches de krigeage. Toutefois, ces approches présentent des avantages et des inconvénients. En effet, les techniques linéaires sont moins exigeantes et leurs estimés indiquent un meilleur lissage par rapport aux techniques non linéaires qui fournissent cependant des résultats plus proches des teneurs réelles [16 - 18]. Mais bien que réduites à deux, pour un gîte donné, le choix de la méthode d'estimation appropriée en contexte de socle paléoprotérozoïque reste délicat. Des critères essentiellement basés sur des paramètres statistiques décrivant la répartition des teneurs au sein du gisement demeurent les principaux guides pour le choix de la méthode. Ces paramètres sont essentiellement le modèle de distribution des fréquences cumulatives ou de distribution de probabilité et ses paramètres de forme notamment le coefficient d'asymétrie, l'écart type, la variance et le coefficient de variation [9, 15]. En général, les méthodes linéaires sont utilisées dans le cas des gîtes présentant une

distribution de teneurs normale et les méthodes non linéaires dans le cas d'une distribution log-normale [11]. Certains auteurs mettent en exergue le coefficient de variation en montrant que lorsque celui-ci varie de 2 à 5, l'utilisation des méthodes linéaires fournit des résultats irréalistes, les méthodes non linéaires sont donc recommandées dans ce cas [16]. Ces approches ont été récemment soutenues par d'autres auteurs ayant effectué des travaux similaires sur différents gîtes aurifères au Ghana et en Australie [11, 17, 18]. Néanmoins, des gîtes présentant des coefficients de variation similaires ont été récemment estimés avec succès par l'application du krigeage ordinaire, d'où une reconsidération du coefficient d'asymétrie dans le choix de la méthode de krigeage. Par ailleurs, la variabilité des critères tels que, l'augmentation de la taille des échantillons, la subdivision du gisement en domaines géologiquement homogènes et le plafonnement des teneurs extrêmes entrainent une réduction de la dispersion de la minéralisation pouvant se traduire statistiquement par une modification du coefficient de variation et des paramètres de forme de la courbe de la distribution de probabilité. Dans le premier cas, étant donné que la formation des composites est de nature linéaire, il en résulte un effet de réduction de la dispersion des teneurs car elle équivaut à une augmentation du support [9]. Dans le second cas, de nombreux articles scientifiques sur l'évaluation des ressources montrent que la classification en domaine de caractéristiques géologiques similaires réduit l'incertitude sur le modèle des ressources [19 - 21]. Enfin, la présence des valeurs extrêmes introduit une variabilité considérable des paramètres statistiques [13,22]. Dès lors, une bonne application de ces critères peut conduire à une nette amélioration des paramètres décrivant la distribution des teneurs et par voie de conséquence guider sur le choix adéquat de la méthode appropriée. Ces modifications ne sont cependant pas sans conséquences sur les ressources estimées. Le présent travail vise à définir une meilleure approche pour un choix judicieux de la technique de krigeage pour une estimation optimale des ressources minérales encaissées dans le socle Paléoprotérozoïque.

2. Méthodologie

Pour cette étude, nous avons retenu deux gisements aurifères localisés dans des endroits différents. Ces gisements, nommés G1 et G2, sont tous encaissés dans les ceintures de roches vertes paléoprotérozoïques ***(Figure 1)*** et ont été caractérisés comme des gisements de type orogénique et parfois en lien avec la mise en place d'intrusifs [24 - 26]. Le gisement G1 est localisé dans la ceinture de Bouroum située au Nord du pays et le gisement G2 est situé dans les zones d'influence de la faille de Tiébelé-Markoye. Ces deux dépôts aurifères montrent généralement une minéralisation portée par des réseaux de veines de quartz organisés en stockwerk et/ou stratifiées et souvent associées à des structures secondaires telles des plis [24, 27]. Ces gîtes ont été délimités en surface et en profondeur sur la base des résultats des forages à circulation inverse de fluide (RC) et au diamant (DD) effectués suivant des mailles variant de 20 m*25 m ou 25 m*25 m à 20 m*50 m ou 25 m*50 m. Ces forages ont été échantillonnés par mètre et les prélèvements ont été analysés au sein des laboratoires accrédités par la technique de la spectrométrie de masse pour la détermination des teneurs individuelles. Au total, 16200 échantillons de 1 mètre ont été récoltés dans le premier gisement G1 et 153117 échantillons de 1 mètre dans le second gisement G2. Les différentes interprétations géologiques des résultats par gîte ont abouti à la subdivision du gisement G1 en quatre zones minéralisées comportant 42 domaines et en une zone pour le gisement G2 avec un total de 31 domaines. En rappel, les domaines sont des portions du gisement au sein desquelles la minéralisation est géologiquement et statistiquement plus homogène qu'à l'extérieur de chacun d'eux. En d'autres termes, la variabilité des teneurs à l'intérieur d'un domaine est statistiquement stationnaire [13, 28]. Des critères géologiques et structurales, la teneur en or, la densité et la qualité mécanique de l'encaissant ainsi que le degré d'oxydation de la franche minéralisée permettent la subdivision en domaines [28].

Sur chacun de ces gisements, des simulations d'analyses statistiques par l'utilisation des logiciels GEOVIA Surpac et IBM SPSS Statistics ont été réalisées en faisant varier individuellement les trois critères à savoir : la décomposition en domaines géologiquement homogènes, la taille du support et le plafonnement des valeurs extrêmes.

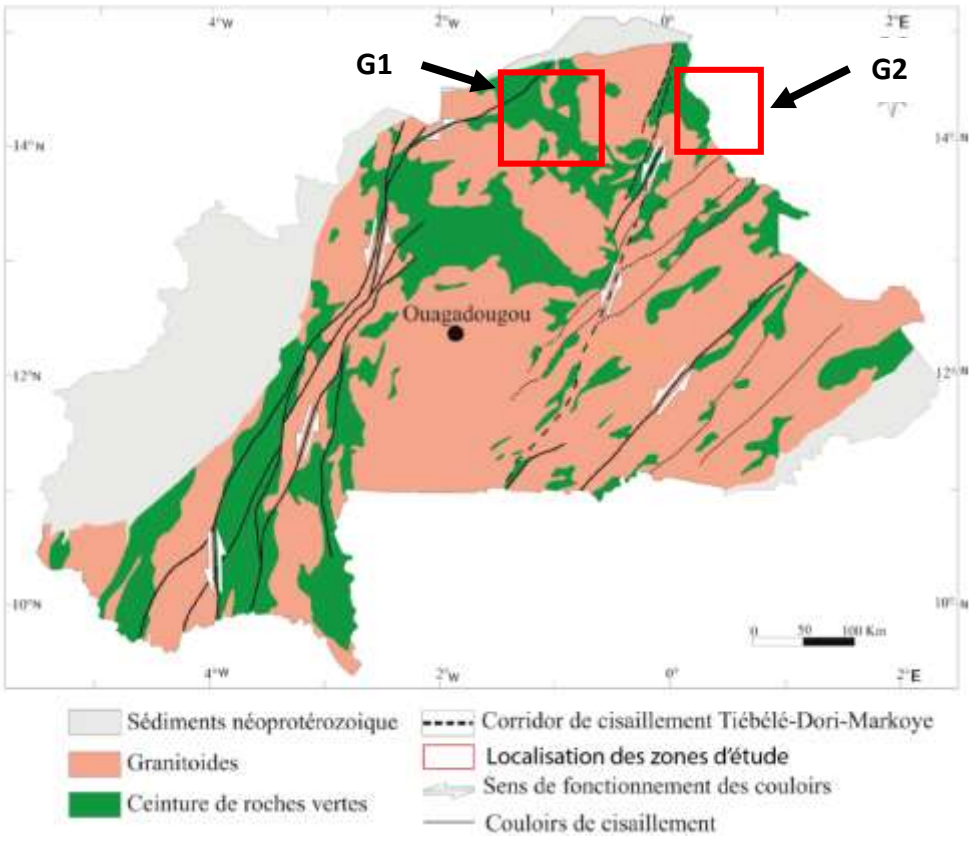

Figure 1 : *Localisation des zones d'étude sur la carte géologique du Burkina Faso, [23], modifiée*

Afin d'apprécier l'incidence du premier critère, deux analyses statistiques avec les mêmes supports ont été réalisées. La première a été faite sur chacune des quatre zones du gisement G1 sans tenir compte du regroupement en domaines homogènes et la seconde a été réalisée sur chaque domaine pris individuellement. Quant à l'effet du changement de support, il a été évalué sur des composites de taille variable. Initialement, l'analyse s'est portée sur les échantillons de 1 mètre de long, puis sur des composites plus grands et formés à partir de ces derniers. Deux simulations d'analyses statistiques ont été également réalisées avec et sans plafonnement afin de mesurer l'influence des valeurs extrêmes. Enfin, les résultats de toutes ces analyses statistiques sont comparées à ceux issus de la synthèse des travaux antérieurs et résumés dans le ***Tableau 1.***

Tableau 1 : *Synthèse des paramètres guidant le choix de la méthode de krigeage*

Critère	Méthodes linéaires	Méthode non linéaires
Distribution de probabilité	Normale	Log normale
Coefficient d'asymétrie	0	≠ 0
Moyenne	?	?
Ecart type	Faible	Relativement élevé
Coefficient de variation	< 2	2 à 5

3. Résultats et discussion

3-1. Subdivision en domaines

Afin de mesurer l'influence de la subdivision des zones minéralisées en domaines géologiquement homogènes nous avons fait cette étude de préférence sur le gîte G1 en raison de sa décomposition en quatre zones constituées chacune de plusieurs domaines ***(Figures 2 et 3)***. Ces résultats montrent que les quatre zones du gisement présentent des teneurs moyennes allant de 1,30 à 2,06 et des écarts types (ETP) et coefficients de variation (CV) allant respectivement de 1,81 à 5,41 et de 1,40 à 3,03. A ce stade, la zone 2 présente un coefficient de variation de 3,03. Cette valeur étant supérieure à 2,5, cela indique une distribution des données avec une variabilité significative [13]. La délimitation en domaines a permis d'avoir 14 domines dans la zone 1, 15 domaines dans la zone 2, 6 domaines dans la zone 3 et 7 domaines dans la zone 4. L'analyse statistique effectuée sur chacun de ces domaines montre que la plupart d'entre eux présentent un écart type et un coefficient de variation inférieurs à ceux de la zone à laquelle ils appartiennent. Cette réduction est notamment plus significative pour le coefficient de variation. Considérant la zone 2 avec au départ un CV de 3,03, seul le domaine DISG de cette zone montre un coefficient de variation supérieur à 2,5 après la délimitation en domaines. Aussi, à l'instar de ce domaine, les domaines DSAC et DSAD de la zone 3, ainsi que DMC de la zone 4 montrent chacun un coefficient de variation supérieur à celui de la zone à laquelle ils appartiennent. Cela se justifierait par une association de deux styles de minéralisation à l'échelle du domaine dont la répartition et la taille ne permettent pas un sous découpage. En outre, la moyenne de chacun de ces paramètres calculée pour l'ensemble des domaines de chaque zone est toujours inférieure à l'écart type et au coefficient de variation de la zone considérée. Ainsi, d'une manière générale, la délimitation en domaines tend à homogénéiser la distribution de la minéralisation par les réductions de l'écart type et notamment du coefficient de variation. Les auteurs comme [29] avaient déjà abouti à des résultats similaires.

Cette approche est indispensable dans le processus d'estimation des ressources et une bonne pratique implique d'abord une meilleure intégration des informations géologiques et structurales avant la vérification de la stationnarité statistique [28]. Cette répartition en domaines peut avoir une incidence sur le choix de la méthode de krigeage. En effet, considérant la zone 2 ***(Figure 2B1)*** qui montre un coefficient de variation de 3,03 avant la délimitation en domaines, le krigeage à indicateurs multiples serait adapté. La subdivision de cette zone en plusieurs domaines, montre que la majorité de ces domaines présente un coefficient de variation inférieur à 2. Cela conduirait au choix du krigeage ordinaire. Aussi, deux approches de krigeage différentes peuvent être utilisées pour l'estimation des ressources d'une même zone minéralisée. En effet, considérant toujours la zone 2 après délimitation en domaines, outre l'utilisation du krigeage ordinaire dans les 14 domaines ayant un coefficient de variation inférieur à 2, le krigeage à multiple indicateurs fournirait un meilleur estimé du domaine DISG où le coefficient de variation est de l'ordre de 5,5. Par ailleurs, la subdivision en domaines peut être source d'une baisse considérable du nombre d'échantillons à manipuler par domaine. A titre d'exemple, la zone 1 composée de 4497 échantillons contient des domaines qui ne sont composés que d'une dizaine d'échantillons. Cela est dû au fait qu'un domaine minéralisé doit obéir à des critères d'homogénéité géologique et statistique vis-à-vis des teneurs, ce qui entraine la mise à l'écart de certaines unités ne remplissant pas ces critères.

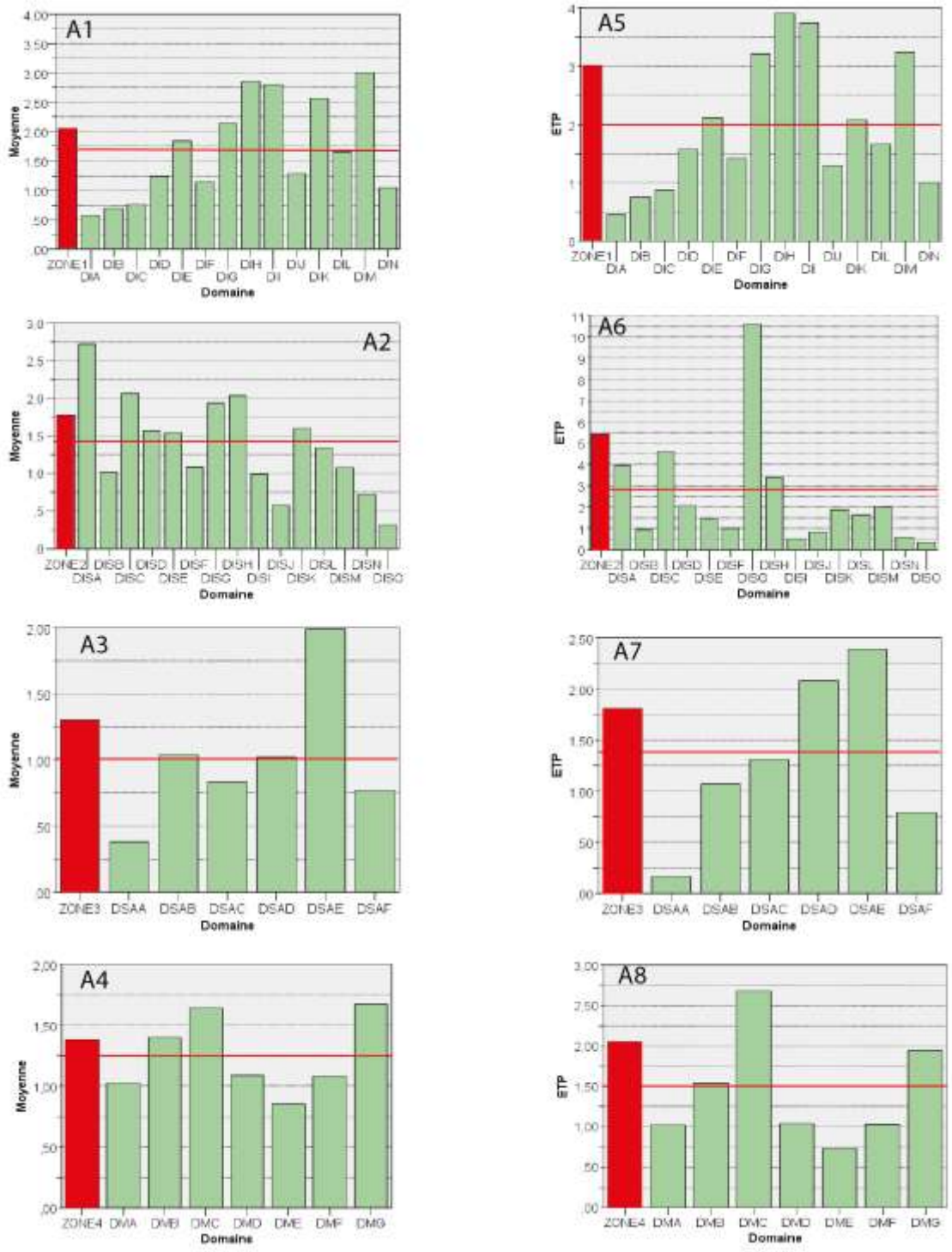

Figure 2 : *Variation de la moyenne et de l'écart type des quatre zones ainsi que de leurs domaines (ETP= Ecart type)*

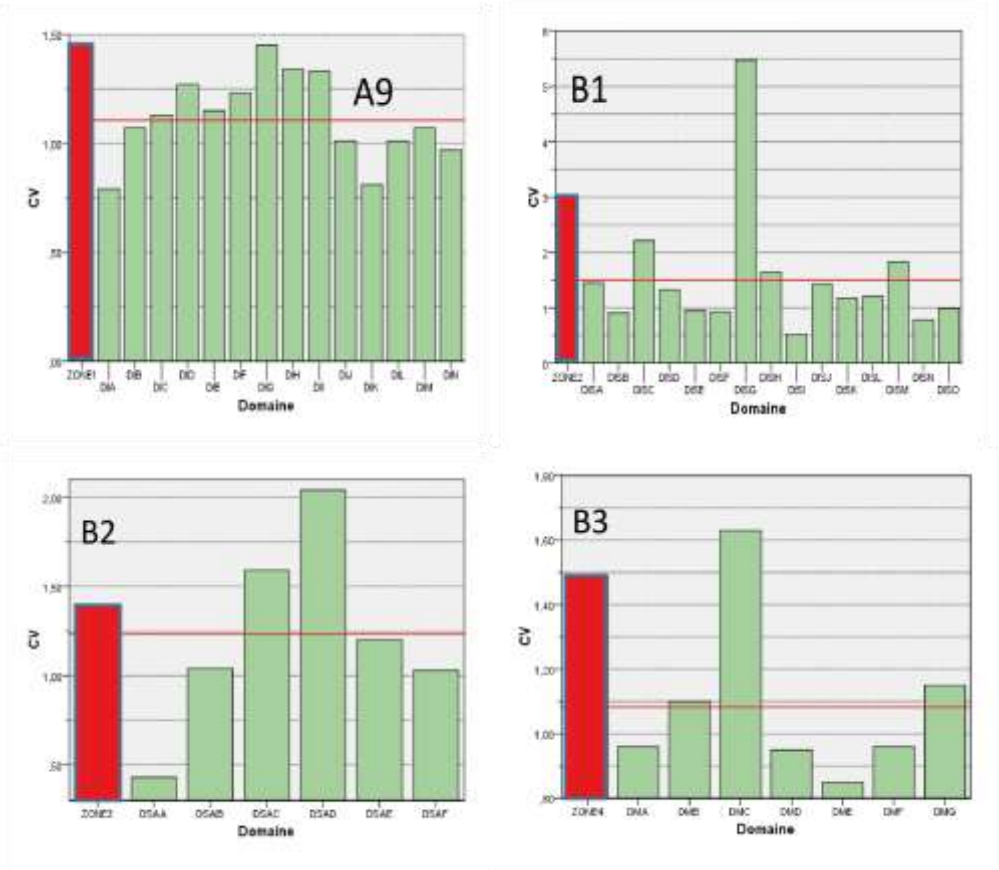

Figure 3 : *Variation du coefficient de variation des quatre zones ainsi que de leurs domaines (Dans les* ***Figures 2*** *et* ***3*** *La ligne horizontale rouge indique la moyenne de chaque paramètre pour l'ensemble des domaines de chaque zone ; CV = coefficient de variation)*

3-2. Changement de la taille des composites

Compte tenu de la taille du gîte G2, l'analyse du changement de la taille des composites a été effectué sur celui-ci. A partir des échantillons de 1 mètre de long, des composites de 5 mètres de long ont été formés. Des statistiques ont ensuite été effectuées sur les deux composites. La ***Figure 4*** présente les résultats relatifs à la dispersion des teneurs sur l'ensemble des domaines ainsi que le comportement de la teneur moyenne des domaines individuels. D'une manière générale, l'augmentation de la taille des composites entraine la réduction de la dispersion des écarts types et des coefficients de variation des domaines minéralisés et, de ce fait, tend à homogénéiser les teneurs minérales comme l'indique l'allure des histogrammes et des courbes gaussiennes associées ***(Figure 4)***. En effet, l'analyse de la dispersion des écarts types et des coefficients de variation des composites de 1 mètre montre des histogrammes dispersés et des courbes gaussiennes asymétriques avec une faible queue vers la droite et des coefficients d'asymétrie équivalents respectivement à 1,326 et 1,628. Ces caractéristiques correspondent à celles d'une distribution log normale [8]. Les composites de 5 mètres présentent par contre des histogrammes plus groupés et des courbes gaussiennes faiblement asymétriques avec des coefficients d'asymétrie respectivement de 0,616 et de 1,264. Cela indique une faible variabilité de la distribution des teneurs de ces composites par rapport à celle des composites de 1 mètre d'où l'affirmation suivante : le coefficient d'asymétrie est une mesure du degré d'asymétrie de la distribution, et de deux coefficients d'asymétrie positifs le plus élevé indique une plus grande variabilité de la distribution de la minéralisation [8]. En outre, avec les composites de 1 mètre, 55 % des domaines du gîte présentent un coefficient de variation inférieur à 5 et 7 % en sont inférieurs à 2. Après l'augmentation du

support à 5 mètres, on note une hausse de ces pourcentages qui passe respectivement de 55 % à 100 % et de 7 % à 35 %. Il en résulte que l'augmentation de la taille des composites entraine une dilution des teneurs qui tendent à se stabiliser [13] ***(Figure 5)***. Cela signifie que les gros supports présentent moins de valeurs extrêmes et davantage de valeurs intermédiaires que les supports de petite taille. En d'autres termes, la formation des composites engendre une réduction des effets des hautes teneurs isolées [9]. Cependant, l'augmentation de la taille des composites peut être source d'une sous-estimation des ressources. Comme l'indique la ***Figure 4 B4 et B5***, une forte augmentation de la taille des composites entraine une réduction de la moyenne tant au niveau des domaines qu'au niveau de la zone entière. En effet, sur ces graphiques on observe qu'après la formation des composites les domaines montrent des teneurs individuelles inférieures à leur valeur initiale. Il en est de même pour la teneur moyenne de l'ensemble de la zone qui passe de 0,60 g/t à 0,45 g/t. Certains domaines peuvent présenter dès lors des moyennes inférieures à la teneur de coupure et, par voie de conséquence, être considérés comme stériles. Pour illustrer ces faits, observons l'évolution de la teneur moyenne des domaines individuels pour différentes teneurs de coupure ***(Figure 6)***:

- A une teneur de coupure de 0,1 g/t, environ 3 % des domaines soit en moyenne 1,70 % des échantillons de 1 mètre présentent des valeurs inférieures à cette teneur, contre 5% des domaines représentant en moyenne 1,40 % des échantillons de 5 mètres ;
- A une teneur de coupure de 0,2 g/t, 7 % des domaines (en moyenne 2,22 % des échantillons de 1 mètre) ont des teneurs en-dessous de cette teneur, contre 19 % des domaines (en moyenne 2,85 % des échantillons de 5 mètres) ;
- A une teneur de coupure de 0,3 g/t, 22 % des domaines (en moyenne 7,84 % des échantillons de 1 m) ont des teneurs en-dessous de cette teneur, contre 34 % des domaines (en moyenne 15,18 % des échantillons de 5 mètres) ;
- A une teneur de coupure de 0,4 g/t, 35 % des domaines (en moyenne 13,63 % des échantillons de 1 mètre) ont des teneurs en-dessous de cette teneur, contre 43 % des domaines (en moyenne 19,48 % des échantillons de 5 mètres) ;
- A une teneur de coupure de 0,5 g/t, 42 % des domaines (en moyenne 17,93 % des échantillons de 1 mètre) indiquent des teneurs en-dessous de cette teneur, contre 66 % des domaines (en moyenne 37,84 % des échantillons de 5 mètres).

En somme, l'augmentation de la taille du composite pour des teneurs de coupure très faibles ($\leq$ 0,1 g/t) n'entraine pas une réduction significative du nombre de domaines et de la quantité d'échantillons ayant des teneurs en-dessous de cette teneur de coupure. Cependant, pour les teneurs de coupures au-delà de 0,1 g/t, les supports de 5 mètres conduisent à une nette augmentation du nombre de domaines et de la quantité des échantillons présentant des teneurs en-dessous de celle-ci. Par conséquent, avec une teneur de coupure de 0,1 g/t, on peut former des composites de 5m sans affecter significativement le nombre de domaine par zone minéralisée. Ce support est donc considéré comme étant la taille du meilleur composite parce qu'il engendre une meilleure homogénéisation du minerai sans pour autant provoquer une chute de celui-ci eu égard à une teneur de coupure de 0,1 g/t.

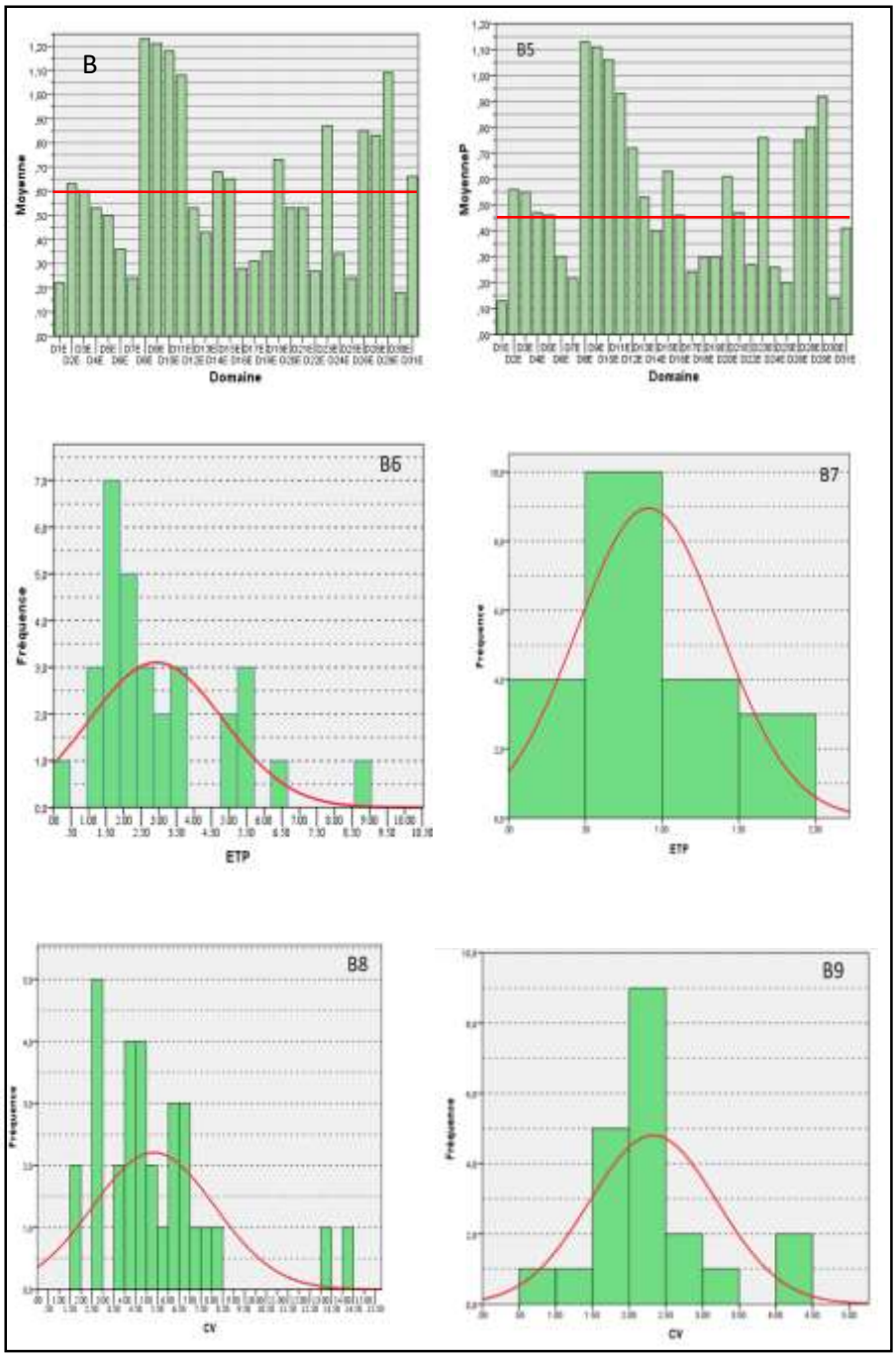

Figure 4 : *Histogrammes avec les moyennes et les courbes gaussiennes des paramètres de dispersion des composites de 1 mètre (à gauche) et de 5 mètres (à droite)*
La ligne horizontale rouge indique la teneur moyenne en or pour les composites de 1 mètre (B4) et de 5 mètres (B5)

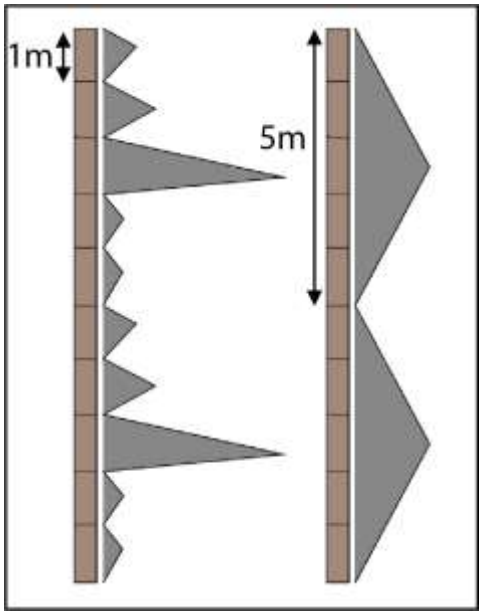

Figure 5 : *Possible dilution des hautes teneurs avec l'augmentation de la taille des composites*

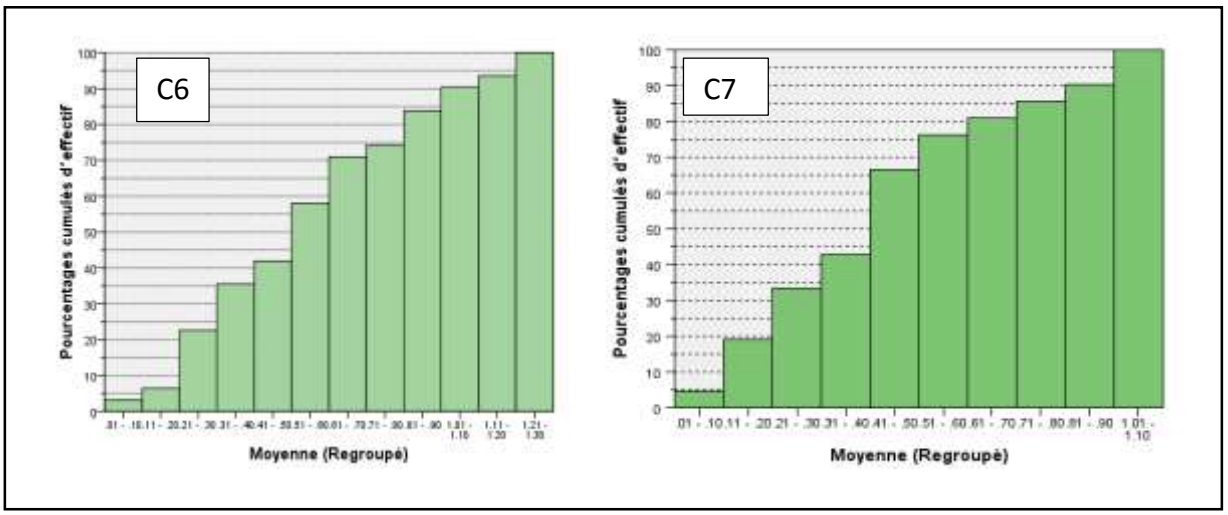

Figure 6 : *Histogrammes des moyennes des domaines pour les composites de 1 mètre (C6) et de 5 mètres (C7)*

3-3. Application d'un plafonnement

L'influence du plafonnement a également été évaluée sur le gîte G2 au regard de sa taille. En fonction de la teneur moyenne et de la variation des teneurs individuelles dans chaque domaine, une coupure sur la teneur qui diffère d'un domaine à l'autre a été appliquée. Sur les 31 domaines, seulement deux n'ont pas subi de coupure. Le reste des domaines a été plafonné avec une moyenne de 17,12 g/t, la plus grande coupure étant de 40g/t. La ***Figure 7 C1 à C4*** met en évidence l'influence de ce plafonnement sur le comportement des teneurs à travers la dispersion des écarts types et des coefficients de variation.

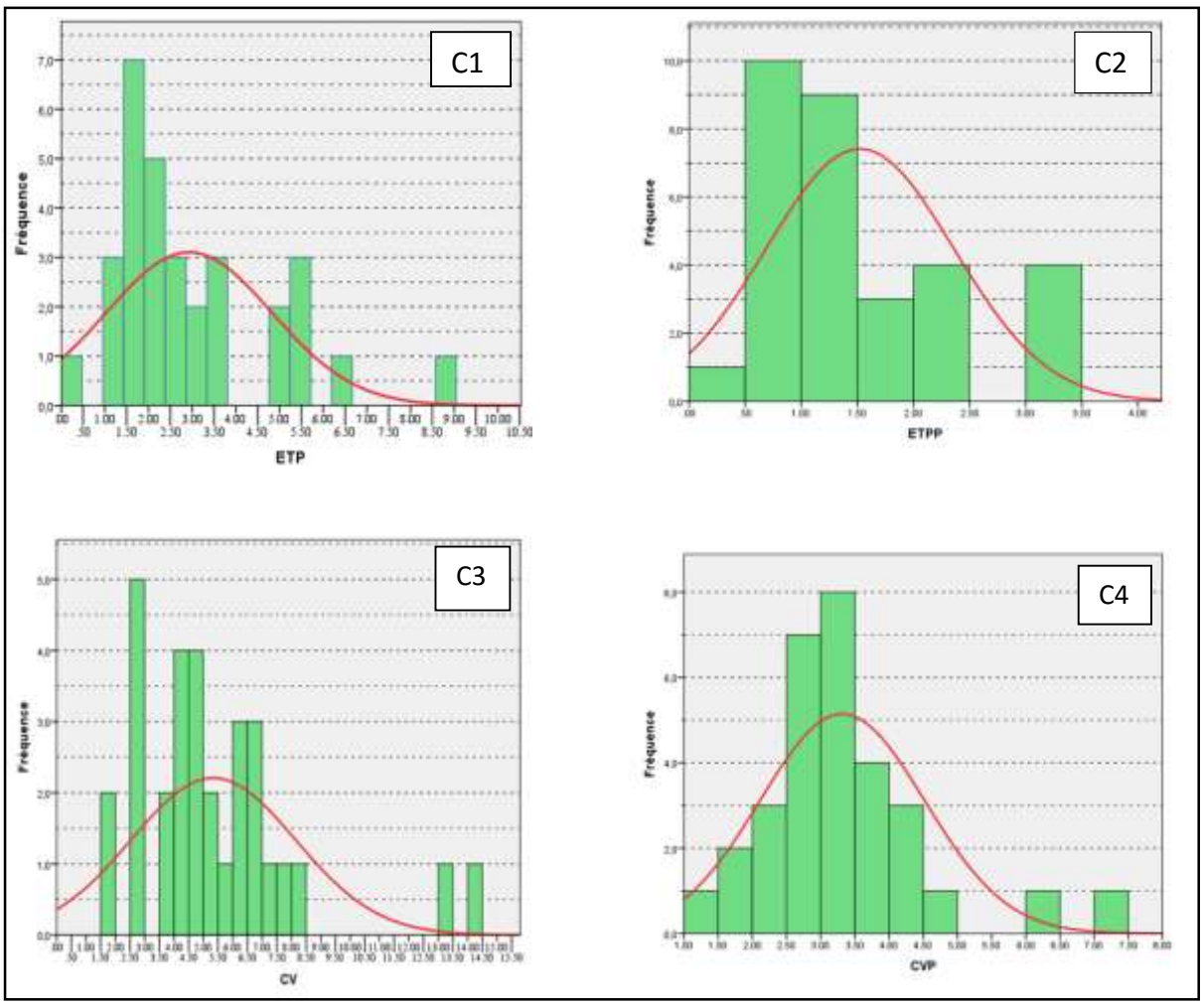

Figure 7 : *Histogrammes avec les courbes gaussiennes des écarts types et coefficients de variation avant (à gauche) et après plafonnement (à droite)*
(ETPP = Ecart type après plafonnement ; CVP = Coefficient de variation après plafonnement)

L'opération de plafonnement permet de réduire le degré d'hétérogénéité de la minéralisation. Cette tendance d'homogénéisation se manifeste par la diminution des paramètres de dispersion comme en témoigne l'allure des histogrammes et des courbes gaussiennes ***(Figure 7)***. En effet, avec l'application des coupures, les histogrammes sont relativement plus groupés et l'asymétrie des courbes gaussiennes décrivant le comportement des écarts types et des coefficients de variation a diminué. Les coefficients d'asymétrie sont passés respectivement de 1,326 et 1,628 à 0,959 et 1,153 traduisant une distribution moins biaisée à droite. Aussi, le coefficient de variation de chacun des domaines de la zone minéralisée a connu une baisse. Ainsi, 10 % des domaines de la zone minéralisées représentant en moyenne 5,31 % des échantillons indiquent un coefficient de variation inférieur à 2 et 95 % des domaines correspondant en moyenne à 98,22 % des échantillons montrent un coefficient de variation inférieur à 5 ***(Figure 9 C8 et C9)***. Ces proportions étaient respectivement de 7 % et 55 % des domaines avant la coupure des valeurs extrêmes. Parallèlement à cette réduction de la dispersion de la minéralisation, on constate des pertes de métal. Celles-ci varient de -4 % à -40,9% avec une moyenne de -13,45 % ***(Figure 8)***.

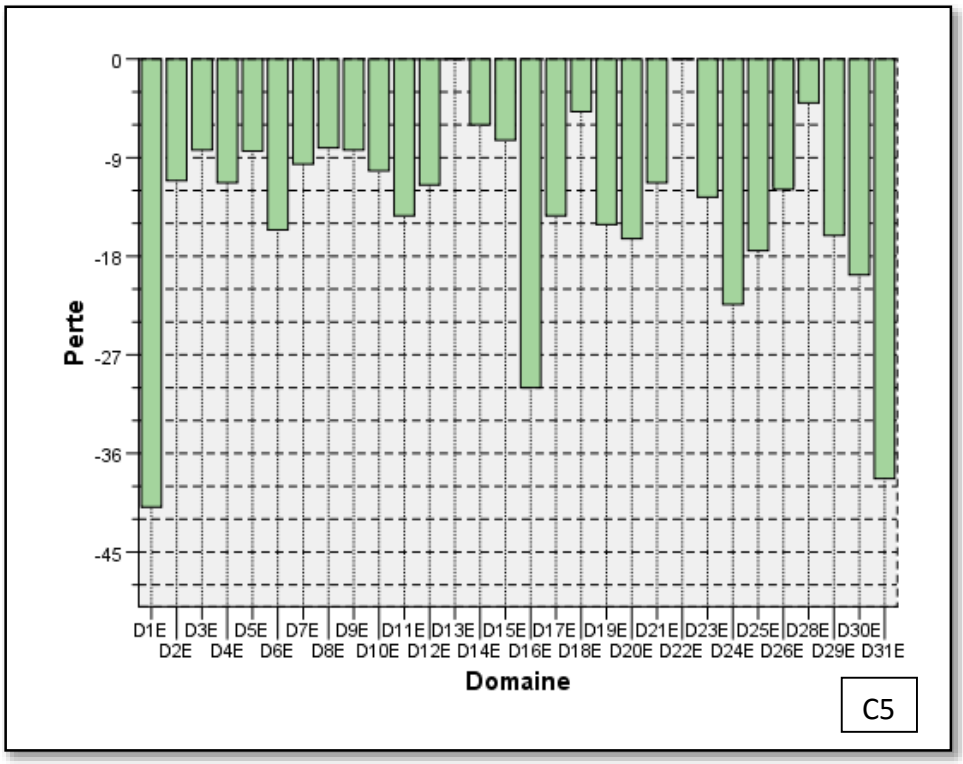

Figure 8 : *Pertes (en %) de métal par domaine minéralisé*

L'analyse de la ***Figure 9 D1*** *et* ***D2*** montre que ces pertes présentent une meilleure corrélation avec le coefficient de variation. Ainsi, plus fort est le coefficient de variation et plus grandes sont les pertes liées à la coupure des teneurs extrêmes. Les domaines ayant subi les grandes pertes de minerai montrent cependant un faible pourcentage d'échantillons dont les teneurs ont été plafonnées (< 1 %) par rapport aux domaines présentant une faible perte où le pourcentage d'échantillons concernés par les coupures est relativement élevé. Cela signifie que les échantillons dont les teneurs ont subi un plafonnement correspondent à des petites pépites d'or fortement dispersées et très rares (12 échantillons en moyenne par domaine). De ce fait, Ces échantillons ne peuvent pas constituer un domaine séparément ***(Figure 10)***. Dans de tels cas, les pertes sont acceptables et la coupure une nécessité. Néanmoins les valeurs extrêmes peuvent parfois représenter différentes populations géologiques qui peuvent correspondre à un domaine physique identifiable et comptabilisé séparément [9].

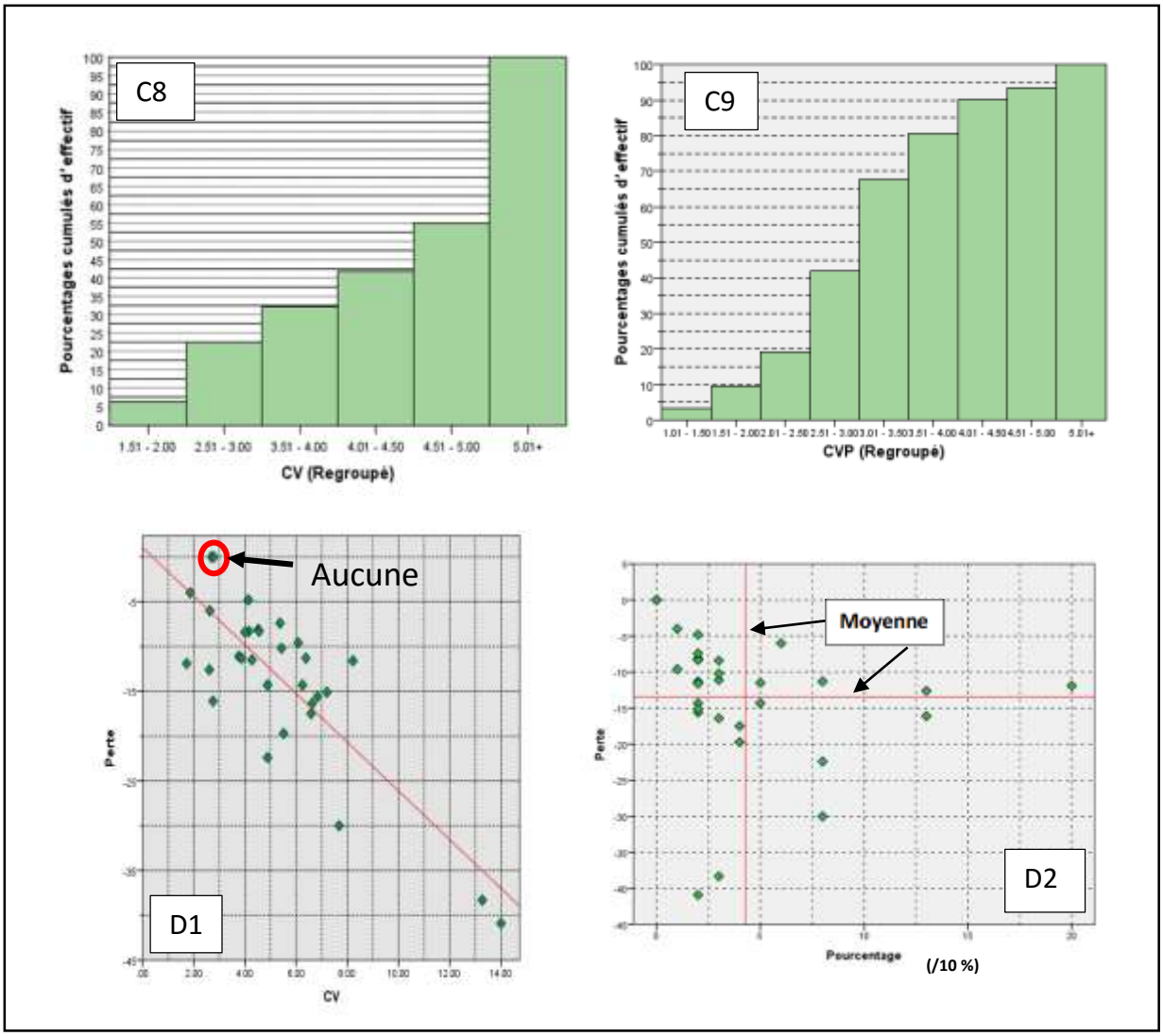

Figure 9 : *Histogrammes des coefficients de variation et diagrammes de corrélation des pertes : C8, Histogramme des coefficients de variations (CV) avant plafonnement ; C9, histogramme des coefficients de variation (CVP) après plafonnement (CVP) ; D1, courbe de corrélation entre les pertes et le coefficient de variation ; D2, relation entre les pertes et le pourcentage d'échantillons plafonnés par domaine*

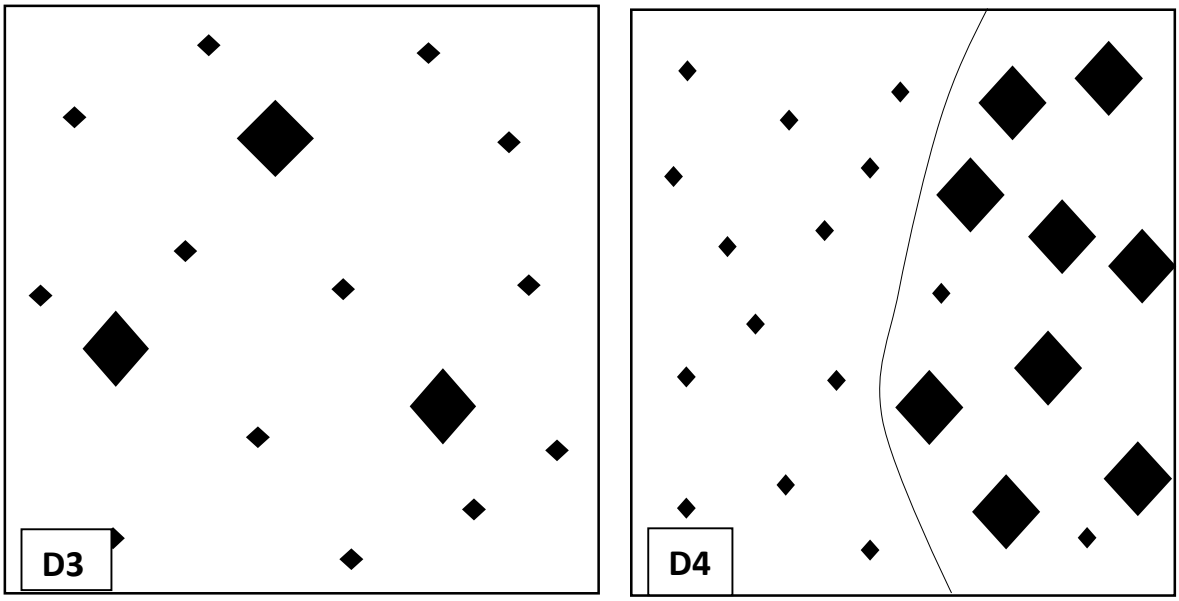

Figure 10 : *Hautes teneurs rares et isolées (D3) ; hautes teneurs groupées en domaine (D4)*
Le schéma à titre illustratif

4. Conclusion

L'analyse statistique est un outil indispensable pour le choix de la méthode d'estimation. Le coefficient de variation, la courbe de la distribution de probabilité et le coefficient d'asymétrie constituent l'essentiel des paramètres à observer lors de l'analyse statistique. Ces paramètres sont sensibles à la décomposition des zones minéralisées en domaines, au plafonnement des teneurs extrêmes et à la formation des composites en ce sens que ces approches contribuent à une réduction de la dispersion de la minéralisation. Lorsque les minéralisations présentent une distribution symétrique à faiblement asymétrique avec un coefficient d'asymétrie proche de 0 et un coefficient de variation inférieur à 2, le krigeage ordinaire peut fournir de bons résultats. Alors que, pour des minéralisations montrant une distribution asymétrique avec un coefficient de variation supérieur à 2 et un coefficient d'asymétrie très loin de 0, le krigeage à multiple indicateurs est recommandé.

Références

[1] - M. LOMPO, Université Paul Sabatier, Toulouse III, France - HDR, (2001)
[2] - D. BEZIAT, M. DUBOIS, P. DEBAT, S. NIKIEMA, S. SALVI and F. TOLLON, "*Journal of African Earth Sciences*", 50 (2008) 125 - 233
[3] - V. MARKWITZ, K. A. A. HEIN, J. MILLER, "*Precambrian Research* " 274 (2016) 61 - 81
[4] - D. I. GROVES, M. SANTOSH, R. J. GOLDFARB, L. ZHANG, "*Geoscience Frontiers* "9 (2018) 1163 - 1177
[5] - V. MARKWITZ, K. A. A. HEIN, M. W. JESSELL, J. MILLER, "*Ore Geology Reviews* "78 (2016) 558 - 563
[6] - S. MURRY, T. TORVELA, H. BILLS, "*Journal of African Earth Sciences* "151 (2019) 351 - 370
[7] - R. J. GOLDFARB, D. I. GROVES, S. GARDOLL, "*Ore Geology Reviews* "18 (2001) 1 - 75
[8] - S. M. GANDHI, B. C. SARKAR, " *Elsevier* " (10th May 2016) 410 p.
[9] - M. B. REVUELTA, "*Springer International Publishing AG* "(2018), 663 p.
[10] - H. F. KING, D. W. McMAHON, G. J. BUJTOR, "*In Proceedings of the Australasian Institute of Mining and Metallurgy, Supplement* ": v. 281, p. 1 - 21

[11] - J. VANN, and D. GUIBAL, *" in Mineral Resources and Ore Reserve Estimation - The AusIMM Guide to Good Practise. Australasian Institute of Mining and Metallurgy",* (2001) 249 - 256
[12] - M. S. KHAKESTAR, H. MADANA, H. HASSANI and P. MOAREFVAND, " *Journal Geological Society of India ",* Vol.81, (April 2013) 581 - 585
[13] - M. E. ROSSI, C. V. DEUTSCH, *" Springer Science Business Media Dordrecht "*(2014), 337 p.
[14] - M. DAVID, *" Developments in Geomathematics 2, Elsevier Scientific Publishing Company- Amsterdam Oxford New York "*(1977)
[15] - A. G. JOURNEL, " Mathematical Geology ", Vol. 15, No. 3, (1983)
[16] - S. AL-HASSAN and E. BOAMAH, *" Ghana Mining Journal ",* Vol. 15, No. 2, (2015) 42 - 49
[17] - A. K. KWAW, S. AL-HASSAN, A. U. CHUKWU, A. O. ASANTE and T. BOTWE, "*Ghana Mining Journal* ", Vol. 18, No. 2, (2018) 21 - 29
[18] - H. RAHIMI, O ASGHARI, F. HAJIZADEH and F MEYSAMI, "*Journal of Mining and Environment*" Vol. 9, No. 4, (2018) 967 - 979
[19] - M. MALEKI, X. EMERY, "*Math Geosci* " 47 (2015) 471 - 49
[20] - H. TABELI, E. H. SABETI, M. AZADI, X. EMERY, "*Ore Geology Reviews* " 75 (2016) 42 - 51
[21] - N. MERY, X. EMERY, A. CACERES, D. RIBEIRO, E. CUNHA, " *Ore Geology Reviews* ", 88 (2017) 336 - 351
[22] - R. S. MACHADO, M. ARMONY and J. F. C. L. COSTA, in P. ABRAHAMSEN, R. HAUGE and O. KOLBJORNSEN (Eds), Quantitative Geology and Geostatistics, Geostatistics Oslo. Springer, Vol. 17, (2012) 383 - 395
[23] - C. CASTAING, M. BILLA, J. P. MILESI, D. THIEBLEMONT, J. LE MENTOUR, E. EGAL, M. DONZEAU, (BRGM) (coordonnateurs) et C. GUERROT, A. COCHERIE, P. CHEVREMONT, M. TEGYEY, Y. ITARD, (BRGM), B. ZIDA, I. OUEDRAOGO, S. KOTE, B.E. KABORE, C. OUEDRAOGO, (BUMIGEB), J. C. KI, & ZUNINO (ANTEA), *" Notice explicative de la Carte géologique et minière du Burkina Faso à 1/1 000 000"* , (2003)
[24] - A. TSHIBUBUDZE and K. A. A. Hein, " *Ore Geology Reviews ",* (2015)
[25] - H. ILBOUDO, S. SAWADOGO, A. S. TRAORE, M. SAMA, U. WENMENGA, M. LOMPO, *Journal of African Earth Sciences* 148 (2018) 52 - 58
[26] - S. SAWADOGO, S. NABA, H. ILBOUDO, A. S. TRAORE, S. NAKOLENDOUSSE, M. LOMPO, *Journal of African Earth Sciences* (2018) 59 - 68
[27] - T. C. McCUAIG, D. FOUGEROUSE, S. SALVI, L. SIEBENALLER, L. A. PARA-AVILA, R. SEED, D. BEZIAT, A.-S. ANDRE-MAYER, *" Ore Geology Reviews "* 78 (2016) 639 - 644
[28] - R. STERK, K. DE JONG, G. PARTINGTON, S. KERKVLIET, M. VAN DE VEN, https://www.researchgate.net/profile/Rene-Sterk/publication/350567948 (21/11/2021)
[29] - J. H. DUKE and P. J. HANNA, "in Mineral Resources and Ore Reserve Estimation - The AusIMM Guide to Good Practise. Australasian Institute of Mining and Metallurgy *",* (2001) 147 - 156