

MODELISATION DE VARIATION DU TENEUR EN OR DES GISEMENTS FILONIENS BASE SUR MACHINE LEARNING EN UTILISANT LA METHODE DES MAXIMUMS DE VRAISEMBLANCE »

1- Andriamasy Andry Malala

Ecole Doctorale Ingénierie et Géosciences (INGE)

2- RAZANADRANAIVO Dinamalala Faniriantsoa

Maitre de Conférences

Ecole Doctorale Ingénierie et Géosciences (INGE)

3- RAVELONANTOANDRO Sedra

Assistant d'Enseignement Supérieur

4- RANDRIANJA Roger

Professeur Titulaire

Ecole Doctorale Ingénierie et Géosciences (INGE)

RESUME

Les résultats issus de la recherche démontrent l'efficacité des modèles proposés dans la prédiction précise de la teneur en or dans les filons aurifères. En outre, l'analyse géologique révèle des corrélations intéressantes entre les caractéristiques géologiques spécifiques et la distribution de la teneur en or, offrant ainsi des insights précieux pour la compréhension des mécanismes sous-jacents. Cette étude représente une avancée significative dans la modélisation de la variation de la teneur en or des gisements d'or filoniens, combinant des approches géostatistiques avancées avec une compréhension approfondie de la géologie sous-jacente. Les résultats obtenus ouvrent la voie à des pratiques minières plus efficaces, tout en suscitant de nouvelles questions pour les futures recherches dans ce domaine complexe. Les résultats issus de cet modèle montrent que la teneur en or est concentrée dans des argiles pour ce gisement filonien et la teneur moyenne en or à ce gisement est de 0.034ppm, l'exploitation de ces zones est donc rentable, même si la teneur en or moyenne est faible.

Mots clés : teneur en or, filons aurifères, géologique, distribution, modélisation

ABSTRACT

The research results demonstrate the effectiveness of the proposed models in accurately predicting gold content in gold veins. In addition, the geological analysis reveals interesting correlations between specific geological features and the distribution of gold content, offering valuable insights into the underlying mechanisms. This study represents a significant advance in the modelling of gold grade variation in lode gold deposits, combining advanced geostatistical approaches with an in-depth understanding of the underlying geology. The results obtained pave the way for more efficient mining practices, while raising new questions for future research in this complex field. The results of this model show that the gold content is concentrated in clays for this vein deposit and the average gold content at this deposit is 0.034ppm, so mining these zones is profitable, even if the average gold content is low.

Keywords: gold content, gold veins, geology, distribution, modeling

INTRODUCTION

L'exploitation minière de l'or a joué un rôle central dans l'histoire économique et géologique dans de nombreuses régions du monde. Parmi les différentes formes de gisements aurifères, les filons d'or, en raison de leur complexité géologique, présentent des variations substantielles dans la teneur en or. Comprendre ces variations et développer des modèles prédictifs précis sont des aspects cruciaux pour l'industrie minière moderne, tant du point de vue de l'efficacité opérationnelle que de la gestion des ressources.

La teneur en or d'un gisement filonien est un facteur important qui détermine sa valeur économique. La teneur en or est la quantité d'or contenue dans une unité de volume de roche. Elle est généralement exprimée en grammes d'or par tonne de roche (g/t).

La teneur en or des gisements filoniens peut varier considérablement. Elle peut être élevée dans certaines zones, et faible dans d'autres zones. Cette variation de la teneur en or est due à de nombreux facteurs, notamment la géologie du gisement, la structure du filon et les conditions de formation du gisement.

La modélisation de la variation de la teneur en or des gisements filoniens est une tâche importante qui peut être utilisée pour améliorer l'exploration et l'exploitation des gisements d'or. Elle permet de prédire la teneur en or dans des zones non explorées, et d'optimiser l'exploitation des zones déjà explorées.

MATERIELS ET METHODES

MATERIELS

On a utilisé Anaconda qui est un outil open-source destiné à la programmation R et Python. Il comprend un ensemble de packages et d'outils essentiels dans des domaines comme Python, Jupyter, Panda, Numpy ... Il est utilisé en intelligence artificielle, machine learning, sciences de données.

Bibliothèque statistique utilisés

On a utilisé Seaborn et Matplotlib.

Seaborn est une bibliothèque permettant de créer des graphiques statistiques en Python. Elle est basée sur Matplotlib, et s'intègre avec les structures Pandas.

Matplotlib est avant tout une librairie qui permet de tracer des fonctions et d'afficher leurs courbes dans des graphiques.

METHODE :

La méthode des maximums de vraisemblance (ML) consiste à maximiser la fonction de vraisemblance des données :

$$L = \prod (g(y_i) / \sum (y_i - \beta_0 - \beta_1 x_{i1} - \beta_2 x_{i2} - \dots - \beta_p x_{ip})^2 * g(y_i))$$

Où :

- L est la fonction de vraisemblance des données
- $g(y_i)$ est la fonction de vraisemblance des données.

Calcul de la fonction de vraisemblance

Pour calculer la fonction de vraisemblance pour des données suivant une distribution gaussienne (normale), on a utilisé la densité de probabilité gaussienne dans la fonction de vraisemblance. On a les données X_1, X_2, \dots, X_n

La densité de probabilité d'une distribution gaussienne pour une observation X_i est donnée par :

$$f(x_i, \mu, \sigma) = \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma^2}} \exp\left(-\frac{(x_i - \mu)^2}{2\sigma^2}\right)$$

Où μ est la moyenne et σ est l'écart-type.

La fonction de vraisemblance pour l'ensemble des données est le produit des densités de probabilité individuelles :

$$L(\mu, \sigma | data) = \prod_{i=1}^n f(x_i, \mu, \sigma)$$

Et le log de la vraisemblance est souvent utilisé pour simplifier les calculs :

$$\text{Log } L(\mu, \sigma | data) = \sum_{i=1}^n \left(\frac{1}{2} \log(2\pi\sigma^2) - \frac{(x_i - \mu)^2}{2\sigma^2} \right)$$

Pour maximiser la log-vraisemblance, on a utilisé les méthodes d'optimisation numérique comme la descente de gradient, la méthode de Newton-Raphson, ou d'autres méthodes.

Descente de Gradient :

Principe : La descente de gradient est un algorithme itératif qui ajuste les paramètres d'un modèle dans la direction opposée du gradient de la fonction objectif. Le gradient indique la direction dans laquelle la fonction croît le plus rapidement.

Avantages : Simple à mettre en œuvre, efficace pour de grands ensembles de données.

Inconvénients : Peut converger lentement dans certaines situations, sensible à la conditionnement de la fonction.

```
#fonction descente de gradient en Python
def gradient_descent(f, df, initial_params, learning_rate=0.01, num_iterations=100):
    params = initial_params
    for _ in range(num_iterations):
        gradient = df(params)
        params = params - learning_rate * gradient
    return params
```

Figure 1: Descente de Gradient

Méthode de Newton-Raphson :

Principe : La méthode de Newton-Raphson est un algorithme itératif basé sur l'idée d'approximer la fonction par une parabole à chaque itération. Elle utilise également la dérivée seconde (la matrice hessienne) pour guider la recherche.

Avantages : Convergence plus rapide que la descente de gradient dans de nombreuses situations, particulièrement lorsque la fonction est bien conditionnée.

Inconvénients : Requiert le calcul de la dérivée seconde (la matrice hessienne), ce qui peut être coûteux.

```
# Méthode de Newton-Raphson en Python
def newton_raphson(f, df, d2f, initial_params, num_iterations=100):
    params = initial_params
    for _ in range(num_iterations):
        gradient = df(params)
        hessian = d2f(params)
        params = params - np.linalg.inv(hessian) @ gradient
    return params
```

Figure 2: Méthode de Newton-Raphson

RESULTAT

Le tableau ci-dessous représente la Statistique descriptive des variations de teneur en or des gisements d'or filoniens. Ce tableau fournit des informations sur la dispersion, la moyenne et la médiane de la teneur en or. Ces informations sont essentielles pour comprendre la variabilité de la teneur en or et pour évaluer la faisabilité de l'exploitation du gisement.

Tableau 1: Statistique descriptive des variations de teneur en or des gisements d'or filoniens

	<i>x</i>	<i>y</i>	<i>profondeur</i>	<i>teneur_ppm</i>
<i>count</i>	121.0	121.0	121.000000	121.000000
<i>mean</i>	702818.0	1431678.0	88.965289	0.034298
<i>std</i>	0.0	0.0	41.883732	0.038661
<i>min</i>	702818.0	1431678.0	1.970000	0.020000
<i>0,25</i>	702818.0	1431678.0	65.220000	0.020000
<i>0,5</i>	702818.0	1431678.0	95.140000	0.020000
<i>0,75</i>	702818.0	1431678.0	123.170000	0.030000
<i>max</i>	702818.0	1431678.0	150.720000	0.34000

D'après ce tableau la teneur moyenne de teneur en or sur ce gisement filonien est de 0.034 ppm.

Tableau -2 : variation de la teneur en or des gisements d'or filoniens

Lithologie	Teneur en or (g/t)
Schiste	0,1 - 1
Grès	0,2 - 2
Argile	0,5 - 5
Quartzite	0,45200
Granite	0,1 - 1
Diorite	0,2 - 2
Gabbro	0,5 - 5

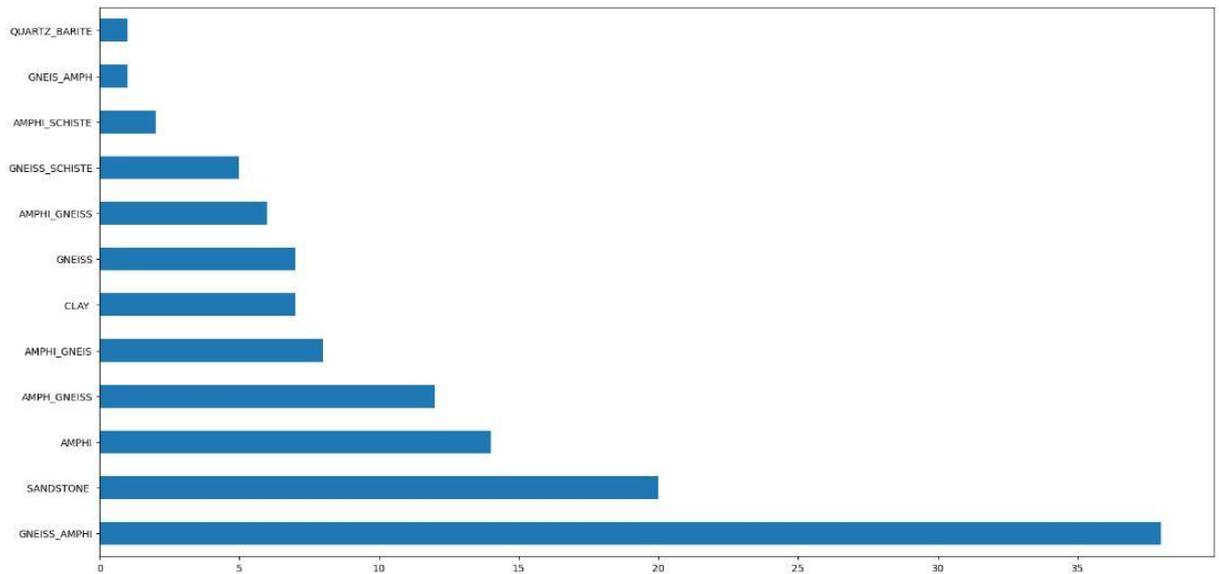


Figure 3: Distribution de la lithologie de gisement filonien

Ce graphique montre que le gneiss amphi domine dans ce gisement filonien. Ceci peut s'expliquer que Madagascar est située dans une zone de convergence entre deux plaques tectoniques, la plaque africaine et la plaque indienne. Cette activité tectonique a également contribué à la formation du gneiss dans la partie nord de Madagascar.

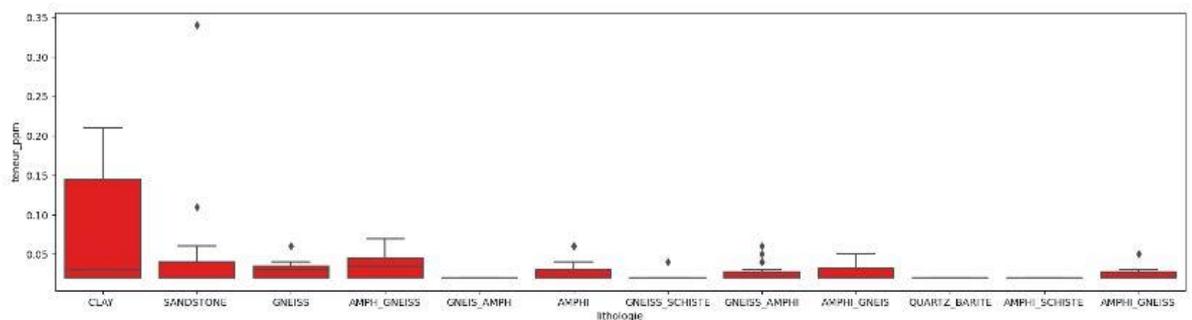


Figure 4: box plot de teneur en or pour un gisement filonien

La teneur en or de ce gisement filonien est élevée aux lithologies de clay (Argile) vu la taille de son box-plot, mais la distribution de la teneur en or est dispersée dans cette formation géologique. Il existe des lithologies à teneur en or exceptionnellement élevée ici dans l'argile suivi de sandstone (grès), mais aussi des lithologies à teneur en or exceptionnellement faible comme dans le amphi-gneiss.

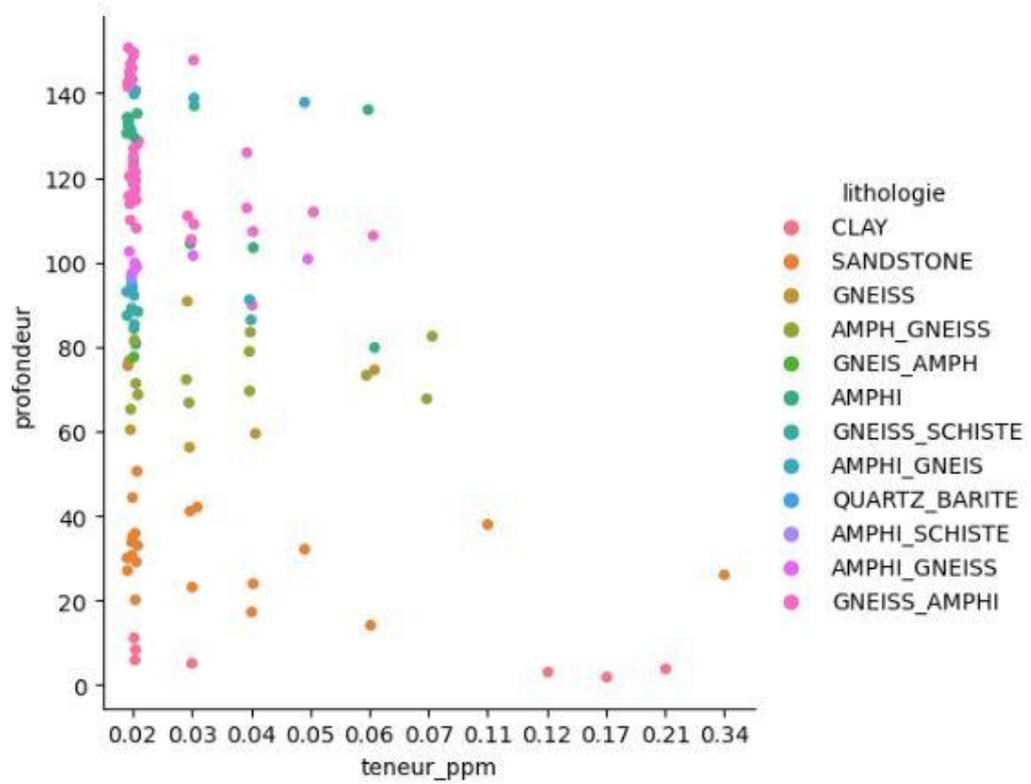


Figure 5: distribution de profondeur selon le teneur en or dans ce gisement d'or filoniens

Ce graphique montre qu'on peut trouver de l'or jusqu'à 150mètre de profondeur.

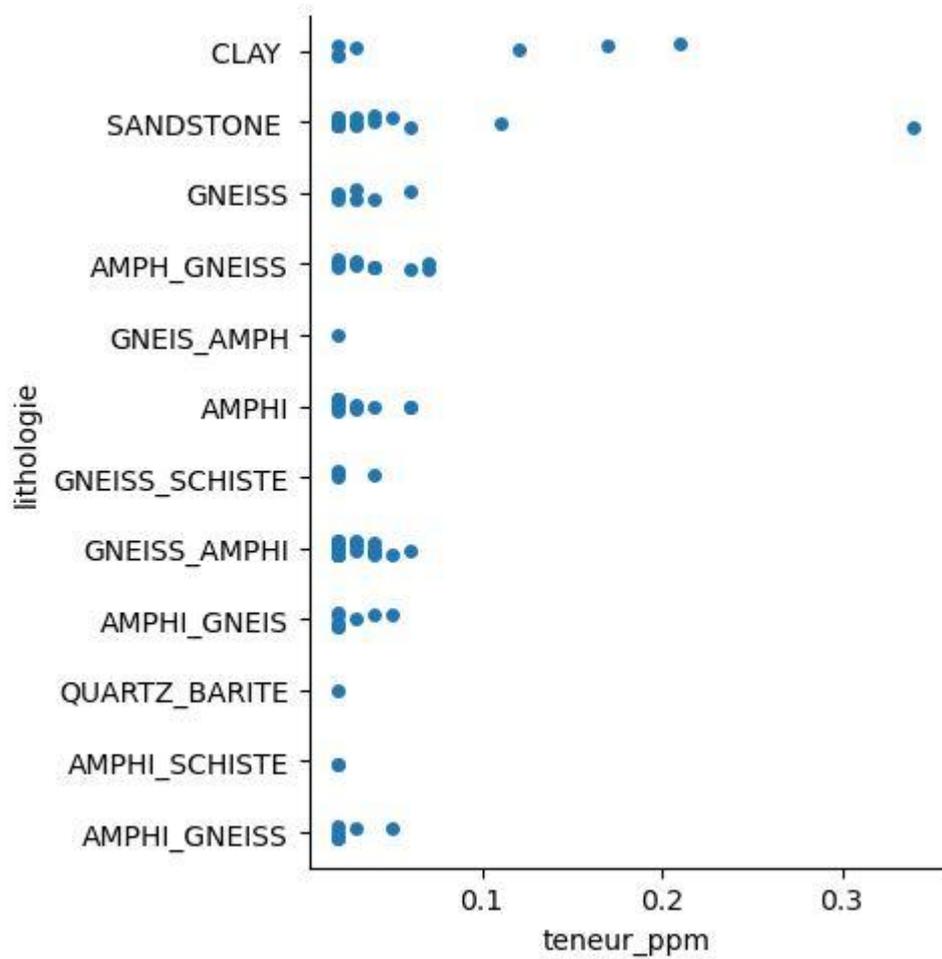


Figure 6: distribution du teneur selon la lithologie de gisements d'or filoniens

D'après ce graphique, on peut dire que l'argile prédomine dans ce gisements d'or filoniens.

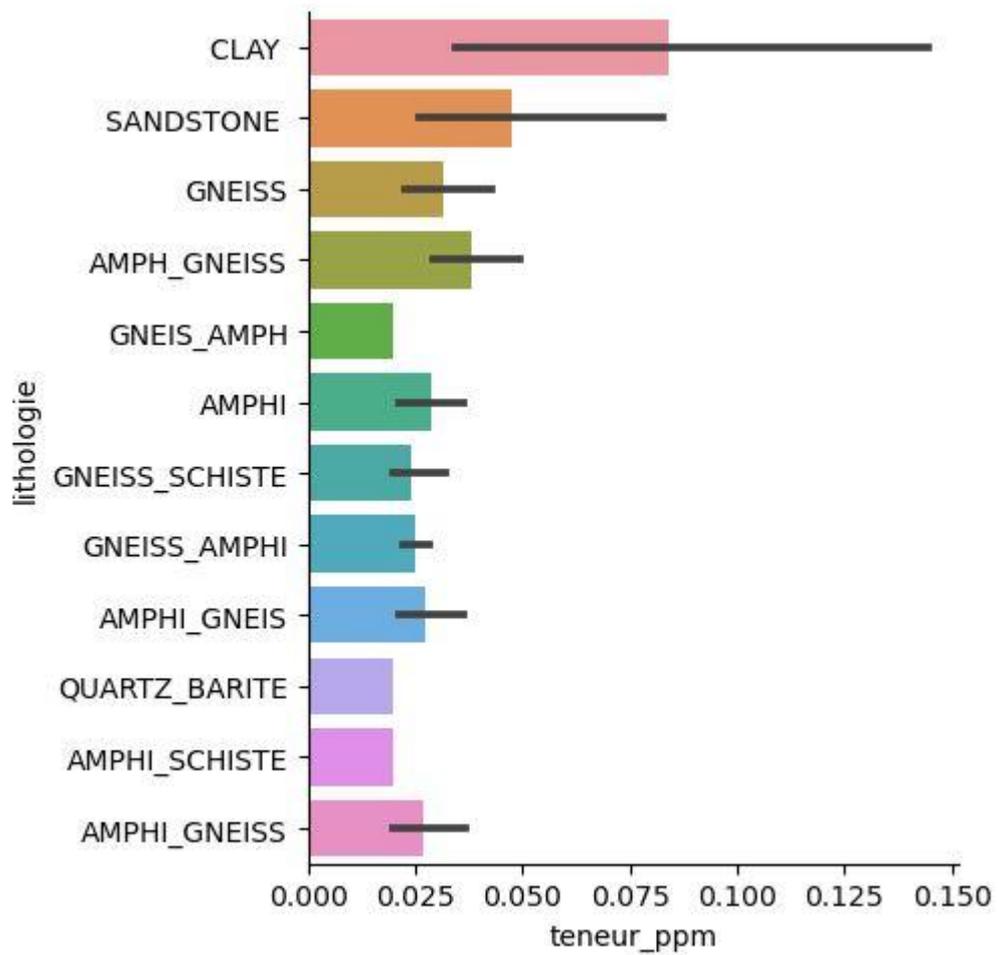
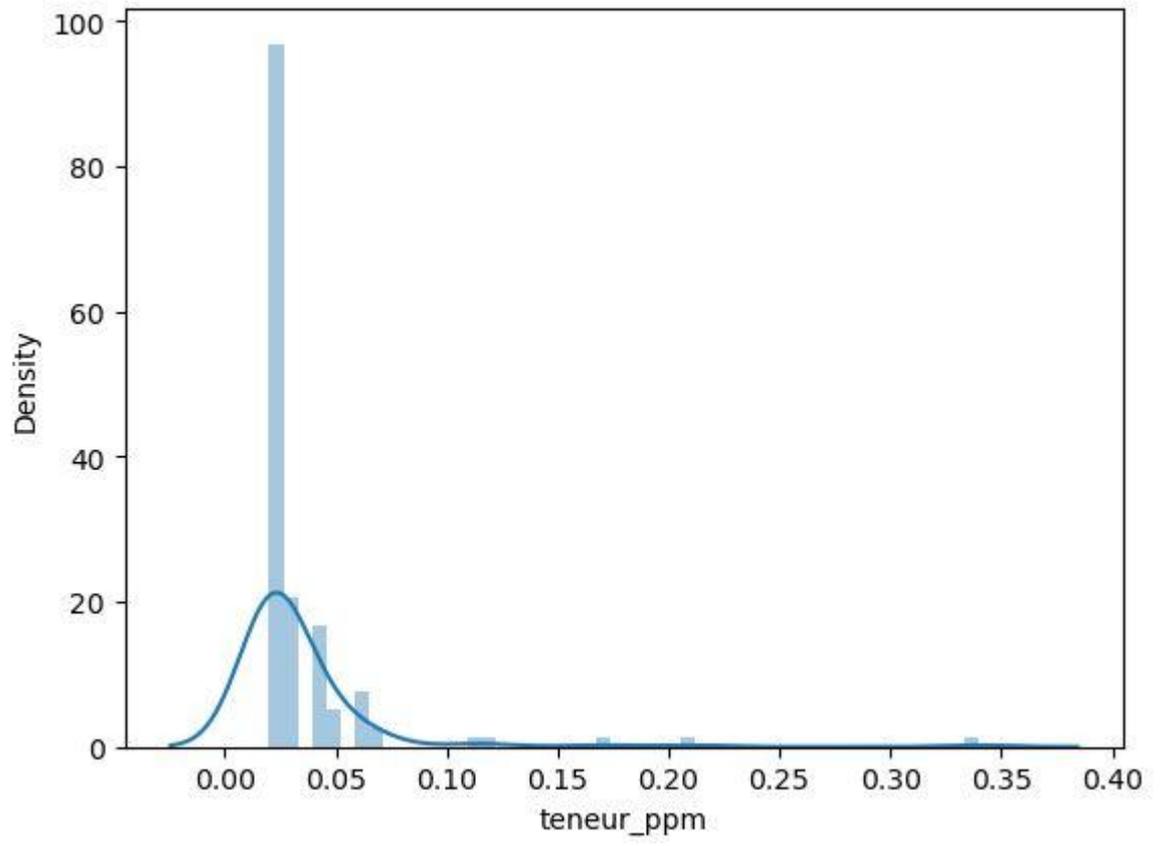
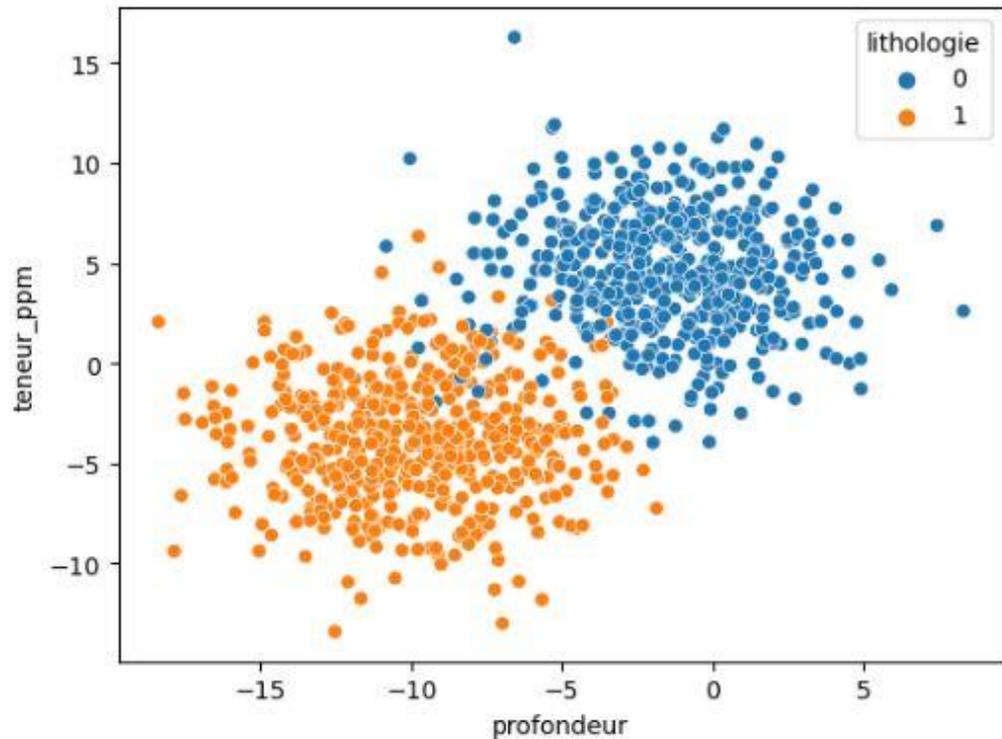


Figure 7: distribution de teneur en or par catégorie de lithologie de gisements d'or filoniens

Ce graphique montre que la teneur en or est répartie de manière déséquilibrée, on le trouve majoritairement pour ce de gisements d'or filoniens dans des clay (Argile) avec de teneur variant de 0.075 jusqu'à 0.1 ppm.





Les figures ci-dessus illustrent la carte iso-teneur de la distribution spatiale de la teneur en or dans la région étudiée. Les couleurs indiquent les variations de teneur, avec les zones de couleurs bleus représentant des concentrations plus élevées et se trouve dans le clay (argile) ceci peut s'expliquer par l'érosion qui a également joué un rôle dans la formation du gneiss dans la partie nord de Madagascar. En érodant les roches sédimentaires et ignées, l'érosion a mis au jour le gneiss, qui est plus résistant à l'érosion.

Corrélations avec les Caractéristiques Géologiques

L'analyse des caractéristiques géologiques révèle des corrélations intéressantes :

Zones de failles géologiques : Teneur en or généralement plus élevée.

Zones d'altération minéralogique : Teneur en or plus faible, suggérant une influence sur la lixiviation de l'or.

Implications pour l'Industrie Minière

Les résultats suggèrent que la modélisation de la teneur en or peut améliorer la planification minière. Les zones à teneur plus élevée peuvent être ciblées de manière plus précise, optimisant ainsi l'extraction de l'or et réduisant les coûts opérationnels.

D'après cette figure on peut dire que le gisement filonien contient des zones à teneur en or exceptionnellement élevée, mais aussi des zones à teneur en or exceptionnellement faible. Cela signifie que le gisement sera susceptible d'être exploité à grande échelle, mais qu'il nécessitera une exploitation sélective pour tirer le meilleur parti des ressources.

Les résultats ci-dessous montrent que la teneur en or des gisements d'or filoniens est généralement plus élevée dans les roches sédimentaires que dans les roches magmatiques. Les schistes et les grès sont les roches sédimentaires les plus riches en or, avec des teneurs pouvant atteindre 1 g/t. Les argiles et les quartzites ont également des teneurs en or relativement élevées, allant de 0,5 à 5 g/t.

Les roches magmatiques, quant à elles, ont généralement des teneurs en or plus faibles, allant de 0,1 à 10 g/t. Les granites sont les roches magmatiques les plus riches en or, avec des teneurs pouvant atteindre 1 g/t. Les diorites et les gabbros ont également des teneurs en or relativement élevées, allant de 0,2 à 2 g/t.

Les résultats obtenus au terme de cette recherche apportent des contributions significatives à la compréhension de la variation de la teneur en or au sein des gisements d'or filoniens, combinant des approches géostatistiques avancées et une analyse approfondie des facteurs géologiques. Les principales observations et conclusions peuvent être résumées comme suit :

Influence des Facteurs Géologiques : L'analyse géologique des résultats révèle des corrélations significatives entre certaines caractéristiques géologiques spécifiques et la distribution de la teneur en or. Les zones présentant une tectonique particulière ou des altérations minéralogiques spécifiques montrent une cohérence avec des variations observées dans la teneur en or. Ces résultats suggèrent l'importance d'intégrer des données géologiques détaillées dans la modélisation de la teneur en or.

Applications Pratiques pour l'Industrie Minière : Les modèles développés dans cette recherche ont des implications pratiques majeures pour l'industrie minière. En fournissant des outils avancés pour la planification minière et la gestion des ressources, cette recherche contribue à améliorer l'efficacité opérationnelle et à optimiser l'extraction de l'or des gisements filoniens.

Vers des Pratiques Minières Durables : En comprenant mieux la variation de la teneur en or, les résultats de cette recherche offrent également des pistes pour une exploitation minière plus durable. Une planification basée sur une compréhension fine des variations locales de la teneur en or peut conduire à une utilisation plus efficace des ressources minières et à des pratiques d'extraction plus respectueuses de l'environnement.

Besoin de Recherches Futures : Malgré ces avancées, certaines zones nécessitent encore des investigations approfondies. La variabilité temporelle de la teneur en or, les interactions complexes entre différents facteurs géologiques, et l'extension de ces modèles à d'autres types de gisements méritent une attention continue dans le domaine de la recherche en géologie et en exploitation minière.

CONCLUSION

Au terme de cette recherche dédiée à la modélisation de la variation de la teneur en or au sein des gisements d'or filoniens, plusieurs conclusions significatives émergent, offrant des contributions substantielles à la compréhension et à l'exploitation de ces ressources aurifères. Cette recherche offre une contribution substantielle à la compréhension scientifique et à l'exploitation efficiente des gisements d'or filoniens. En combinant des approches géostatistiques novatrices avec une analyse géologique approfondie, elle éclaire les processus complexes régissant la distribution de la teneur en or. Ces résultats ne sont pas seulement pertinents pour la recherche académique, mais également essentiels pour orienter les pratiques de l'industrie minière vers un avenir durable et responsable. La teneur en or des gisements filoniens est un facteur important qui détermine leur valeur économique. La modélisation de la variation de la teneur en or est une tâche importante qui peut être utilisée pour améliorer l'exploration et l'exploitation des gisements d'or.

Les résultats de cette étude ont montré que la teneur en or des gisements filoniens est influencée par de nombreux facteurs, notamment la géologie du gisement, la structure du filon et les conditions de formation du gisement. Les modèles statistiques développés dans cette étude ont permis de modéliser la variation de la teneur en or en fonction de ces facteurs.

L'évaluation des modèles développés a montré qu'ils sont capables de prédire la teneur en or avec une précision acceptable. Ces modèles peuvent donc être utilisés pour améliorer l'exploration et l'exploitation des gisements d'or.

BIBLIOGRAPHIE

- [1]- Mallet, R. (2002). *Data Mining and Mineral Exploration*. Oxford: Elsevier Science.
- [2]- Journel, A. G., & Huijbregts, C. J. (1978). *Mining Geostatistics*. New York: Academic Press.
- [3]- Krige, D. G. (1951). A statistical approach to some basic mine valuation problems on the Witwatersrand. *Journal of the Chemical, Metallurgical and Mining Society of South Africa*, 52(6), 119-139.
- [4]- Isaaks, E. H., & Srivastava, R. M. (1989). *An Introduction to Applied Geostatistics*. New York: Oxford University Press.
- [5]- Deutsch, C. V., & Journel, A. G. (1992). *GSLIB: Geostatistical Software Library and User's Guide*. New York: Oxford University Press.
- [6]- Dowd, P. A., & Aspinall, W. P. (1997). Geostatistical modeling of spatial variability in gold deposit grades. *Mathematical Geology*, 29(4), 503-525.
- [7]- Agterberg, F. P. (1994). Combining indicator patterns in weights of evidence modeling for resource evaluation. *Nonrenewable Resources*, 3(3), 129-144.
- [8]- Bonham-Carter, G. F. (1994). *Geographic Information Systems for Geoscientists: Modelling with GIS*. New York: Pergamon.
- [9]- Sambridge, M., & Mosegaard, K. (2002). Monte Carlo methods in geophysical inverse problems. *Reviews of Geophysics*, 40(3), 1-29.
- [10]- Singer, D. A. (1995). The formation of gold deposits. *Reviews in Economic Geology*, 7, 71-94.
- [11]- Sinclair, A. J. (2001). *Applied Mineral Inventory Estimation*. Cambridge: Cambridge University Press.
- [1]- Haldar, S. K. (2013). *Mineral Exploration: Principles and Applications*. Oxford: Elsevier.