

Modélisation des formations géologiques du prospect CMA-Nord du projet aurifère du Yaouré, Angovia, Centre - Ouest de la Côte d'Ivoire

Charles Kouadio NIANGORAN^{1*}, Jean Marcel Koua KINIMO², Séraphin Agré DJOMO¹
et Or Aimon Brou Koffi KABLAM¹

¹Université Jean Lorougnon Guédé de Daloa, Laboratoire Sciences et technologie de l'environnement

²Unité de Formation et de Recherche des Sciences et Technologies des Aliments de l'université
Nangui Abrogoua, Abidjan, Côte d'Ivoire

* Correspondance, courriel : kniangoran@hotmail.fr

Résumé

Pour visualiser, comprendre et étudier le contexte géologique et minéral, une recherche s'est effectuée à l'aide des modèles tridimensionnels pour cartographier et estimer les ressources aurifères du prospect CMA-Nord du Yaouré. Les résultats ont montré que la minéralisation est associée à zone superficielle altérée correspondant au minéral oxydé et à des niveaux sulfurés profonds caractérisés par des basaltes, des intrusifs de roches mafiques sub-volcaniques et de granodiorites. Selon le modèle obtenu, une analyse estimative du minéral a révélé distinctement que le minéral oxydé est caractérisé par un tonnage d'environ 240094 pour une teneur en or moyenne de 0,281 g/T et le minéral sulfuré défini par une quantité de 2039566 tonnes pour une teneur en or moyenne égale à 0,695 g/T.

Mots-clés : minéralisation aurifère, cartographie, sondage minier, modélisation, Yaouré, Côte d'Ivoire.

Abstract

Modeling of the geological formations of the CMA-North prospect of Yaouré gold project, Angovia, West Central Côte d'Ivoire

To visualize, understand and study the geological and mineral context, a research was carried out using three-dimensional models to map and estimate the gold resources of the CMA-North prospect of Yaouré. The results showed that the mineralization is associated with an altered surface zone corresponding to oxidized ore and deep sulphide levels characterized by basalts, intrusives of sub-volcanic mafic rocks and granodiorites. According to the model obtained, an estimated ore analysis clearly revealed that the oxidized ore is characterized by a tonnage of approximately 240094 for an average gold grade of 0.281 g / T and sulphide ore defined by an amount of 2039566 T for a grade of in average gold equal to 0.695 g / T.

Keywords : gold mineralization, mapping, mining survey, modeling, Yaouré, Côte d'Ivoire.

1. Introduction

Depuis ces deux siècles derniers, les géologues ont travaillé à la cartographie de la surface de la terre afin de créer des cartes servant d'outils à toute étude géologique récente [1]. Ces cartes sont donc des moyens d'archiver et de transmettre de l'information géologique [2]. Cependant, vu qu'elles ne donnent généralement que des informations superficielles, elles présentent des limites quant à la connaissance des formations et structures géologiques profondes. Aujourd'hui avec les progrès de l'informatique, il est possible, à l'aide des sondages miniers, d'avoir plus de compréhension sur l'architecture du sous-sol. Pour amoindrir les coûts financiers et réduire le temps de recherche, des modèles 3D sont des outils indispensables pour la quantification des structures géologiques et des ressources minérales [3 - 5]. Ces modèles 3D permettent de représenter des objets en faisant l'analyse simultanée de trois dimensions (longueur, largeur et hauteur) des systèmes géologiques en fonction de leurs propriétés (porosité, résistivité, concentration en métaux, etc.) et des minéraux. C'est dans cette perspective que s'inscrit la présente étude qui a pour but de modéliser et d'estimer les ressources minières du prospect CMA-Nord du projet aurifère du Yaouré (Centre-Ouest de la Côte d'Ivoire) en vue de connaître l'identité du profil d'altération recouvrant les formations minéralisées.

2. Cadre de l'étude

Le prospect CMA-Nord fait partie du permis de recherche 397 de la société PERSEUS MINING LIMITED. Il est situé dans les Monts Yaouré, plus précisément dans le département de Bouaflé situé à 300 km d'Abidjan et à 50 km de Yamoussoukro. Il est délimité par les longitudes $5^{\circ}31'05''W$ et $5^{\circ}31'28''W$ et les latitudes $7^{\circ}01'22''$ et $7^{\circ}01'38''$ (*Figure 1*).

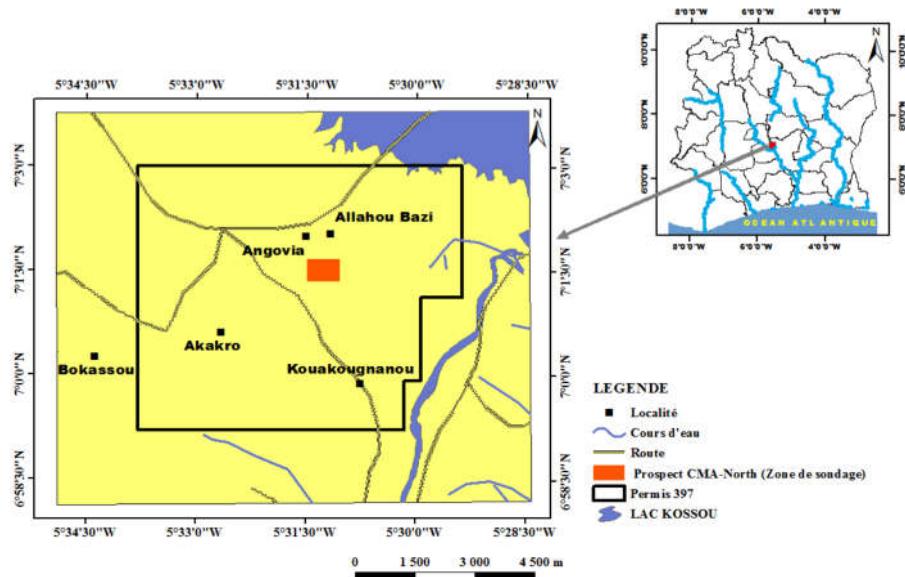


Figure 1 : Localisation de la zone d'étude

3. Matériel et méthodes

3-1. Matériel

Pour ce travail, on a utilisé du matériel de prospection géologique (masse, marteau, boussole, GPS, etc.) pour les recherches et la description des affleurements et structures observés sur le terrain; et une base de données obtenue des opérations de sondages miniers (sondages RC et DD) et des logiciels MapInfo-Discover

et ArcGis. La base de données est constituée de cinq tables : la table relative à l'identité des forages, la table du suivi de la direction et du pendage des forages, la table des teneurs en or, la table contenant les lithologies et la table des densités. Cette base a permis d'identifier, d'avoir les informations géologiques relatives aux autres tables de travail des différents forages programmés pour l'étude des sondages. Ces mêmes outils utilisés ont permis d'évaluer les teneurs en or des zones minéralisées des échantillons prélevés et étudiés au laboratoire.

3-2. Méthodes

Une campagne de sondages miniers a permis d'obtenir la base de données pour la construction du modèle du site d'étude.

3-2-1. Sondages

Les sondages miniers constituent une technique de recherche qui permet d'étudier en profondeur, les caractéristiques de la minéralisation. Ils se définissent par des trous de faibles diamètres (5 cm à 15 cm) et d'une profondeur d'environ 500 m. La recherche a été faite avec deux types de sondages : sondage reverse circulation (RC) et sondage diamond drilling (DD).

3-2-1-1. Sondage RC

Les sondages RC appartiennent à la famille des sondages dits destructifs. Ils consistent à désagréger la roche par un outil adapté et à la remonter vers la surface sous forme de débris appelé « *cutting* » à l'aide d'un fluide généralement injecté par le train de tige (l'air). Les tiges utilisées sont en acier et longues de 6 m. Ces tiges comportent un double espace : un pour l'injection de l'air vers le fond du trou et l'autre pour le transport retour de celui-ci chargé des *cuttings*. La profondeur du trou est variable. Pour cette étude, on a utilisé des données provenant de 43 sondages de type RC.

3-2-1-2. Sondage DD

Ce type de sondage dit carotté permet de recueillir un échantillon continu des roches traversées par les tiges de forage. La carotte de sondage donne des informations sur les structures et les relations de recouplement de celles-ci. Ce sondage utilise une couronne cylindrique aux bords incrustés de diamant artificiel qui fonctionne sous la forme d'une rotation pénétrante dans le massif rocheux. Il s'exerce également sous pression physique continue sur le train de tige. Aussi sa couronne découpe la roche sous la forme d'une tige appelée carotte qui se loge dans un compartiment spécial appelé carottier interne situé dans l'espace annulaire du train de tiges. Les carottes obtenues sont acheminées à la fin des opérations à la carothèque pour des études plus approfondies. Pour cette étude, on a collecté des données issues de 76 sondages carottés (DD).

3-2-2. Construction du modèle

La construction du modèle débute par une vérification et une mise en forme des données. Ensuite, il s'agit d'établir une série de sections des sondages sur lesquels l'on va digitaliser les zones minéralisées. Après la digitalisation, une triangulation de ces zones est réalisée, ce qui permet de construire les solides 3D représentant la minéralisation.

3-2-2-1. Validation et structuration des données

C'est une étape préliminaire avant la modélisation proprement dite. En effet, pour pouvoir utiliser les données issues des sondages, il est nécessaire de réaliser une succession de tâches de tri, de sélection, de mise en

forme des données ainsi que de structuration afin de s'assurer de leur cohérence et pour qu'elles puissent être utilisées efficacement lors de la réalisation du modèle.

3-2-2-2. Réalisation des sections

La première étape d'un projet de modélisation consiste à établir une série de sections des forages à partir des données contenues dans les tables de la base de données. Une section est une représentation en coupe verticale de coordonnées (X ; Z) des sondages réalisés sur une ligne. Elle sert à tracer par interprétation les limites géologiques des différents types de roches. Elle vise également à corrélérer un sondage à un autre, les différentes couches géologiques entre elles. Outre cela, elle permet aussi de définir la limite entre le minerai oxydé et le minerai sulfuré. Les structures minéralisées (représentées dans notre cas par des veines de quartz) sont également représentées pour chaque sondage à la profondeur à laquelle elles ont été mesurées. Les 119 sondages réalisés (**Figure 2**) ont été répartis sur un total de 11 sections orientées E-W et séparées les unes des autres de 50 m. Cependant, pour ces travaux, on ne décrira que les sections 777085N et 777485N.

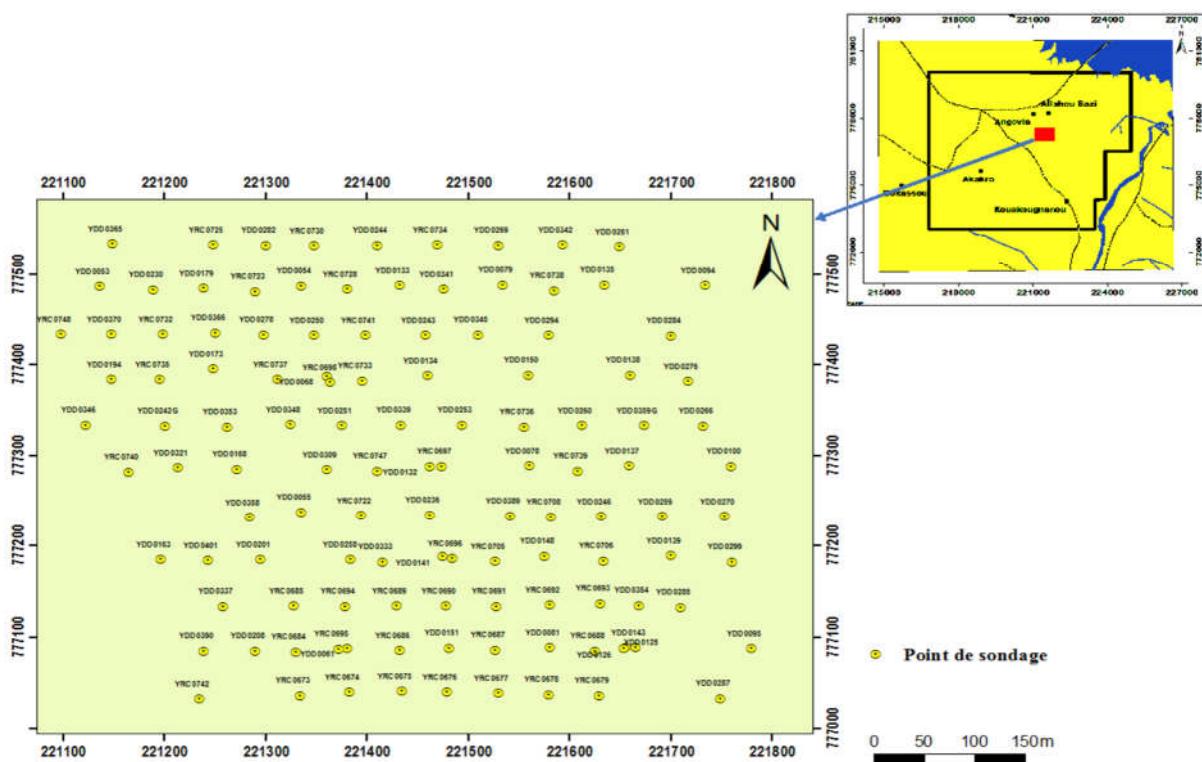


Figure 2 : Plan de positionnement des sondages miniers réalisés

3-2-2-3. Digitalisation des zones d'importances

Cette étape consiste en une description des enveloppes des teneurs en utilisant une teneur de coupure d'or fixée à 0,4 g/T, aussi bien pour le minerai oxydé que pour le sulfuré. Les zones en rouge représentent les teneurs supérieures ou égales à 0,4 g/T (**Figure 3**). Cela se fait en délimitant les zones dont les teneurs en or sont supérieures ou égales à la teneur de coupure et en les réunissant en fichiers de type « STRING ». Ces fichiers sont constitués d'une succession de coordonnées (X ; Y ; Z) représentant dans ce cas, les teneurs supérieures ou égales à 0,4 g/T.

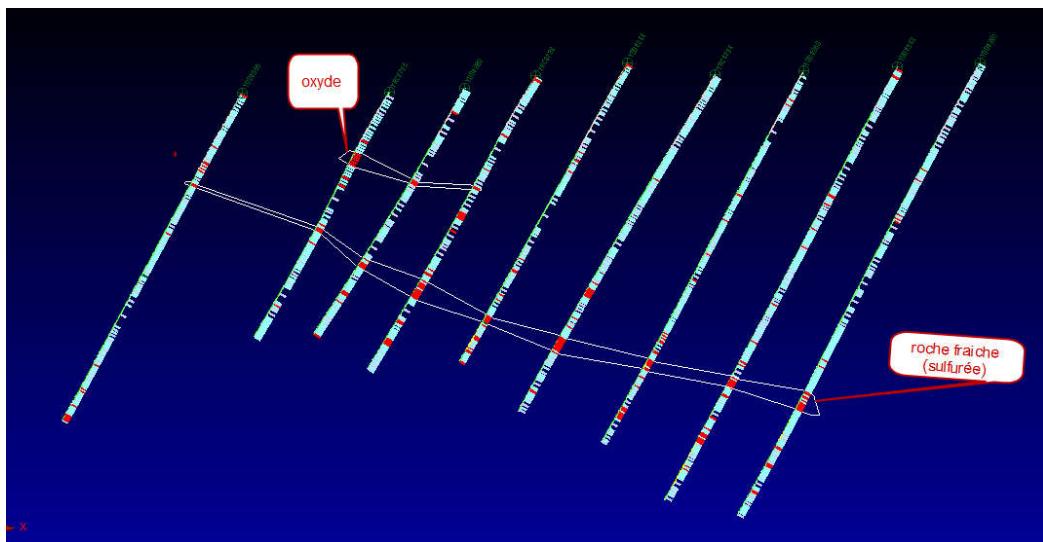


Figure 3 : Sections d'illustration des taux de teneur en or $\geq 0,4$

3-2-2-4. Triangulation des données

Les enveloppes de teneurs de l'oxydé et du sulfuré (fichiers *String*) obtenues à l'étape précédente sur les différentes sections, permettent de générer des fichiers *Digital terrain Model* (DTM) par le processus de triangulation. La surface DTM obtenue est un ensemble de triangles qui représente la surface occupée par la minéralisation.

3-2-2-5. Modèle de la minéralisation

Le modèle de la minéralisation est obtenu à partir des *wire frames* qui sont des formes de solides 3D générés après avoir validé les DTM obtenus sur les teneurs de l'oxydé et du sulfuré.

3-2-3. Analyse statistique des données

L'estimation des ressources débute par une analyse statistique des données visant à identifier les biais éventuels qui pourraient fausser ladite estimation. Ainsi, quelques paramètres statistiques de la table contenant les teneurs en or sont déterminés pour caractériser le comportement numérique (distribution statistique) des teneurs.

4. Résultats

4-1. Étude du profil des sondages miniers

Les sections illustrées aux **Figures 4 et 5** présentent des résultats presqu'identiques. En effet, dans la plupart des sondages miniers analysés, on note que la géologie du prospect CMA-Nord du Yaouré est caractérisée par des basaltes et des intrusifs sub-volcaniques indifférenciés surmontés successivement par la saprolite (comportant parfois des veines de quartz) et les remblais (issus d'anciens travaux d'exploitation). À certains endroits, on identifie en profondeur des granodiorites. Sur le plan métallogénique, les analyses montrent que la saprolite (zone d'altérites) correspond à une zone d'altération supergène mettant en évidence la partie oxydée du minerai (minerai oxydé) du prospect étudié. De plus, la plupart des veines de quartz qui s'y trouvent, présentent de bons indices aurifères. La zone de roches saines caractérisées par les basaltes

est l'encaissant de la minéralisation mettant en relief la partie sulfurée du mineraï (mineraï sulfuré). On note aussi dans les intrusions de granodiorites, d'autres intrusifs silicatés et de sub-volcaniques indifférenciés la présence de magnésium et de fer. Au niveau des teneurs en Or des différentes zones minéralisées représentées sous forme d'histogrammes dans les sondages, la section 777085N montre que les fortes teneurs pour le mineraï oxydé sont observées en profondeur entre 8 et 19 m. Quant au sulfuré, les zones d'importances sont rencontrées dans les intervalles de 90 à 310 m de profondeur (**Figure 4**). Pour la section 777435N, les fortes teneurs en or pour le mineraï oxydé sont identifiées entre 10 et 25 m de profondeur. Quant au sulfuré, les zones d'importances sont relevées entre 170 à 395 m de profondeur (**Figure 5**). Dans l'ensemble, au niveau des deux sections décrites, les différentes zones minéralisées sont généralement caractérisées par une teneur en or comprise entre 0,4 et 1 g/T. Toutefois, en endroit, il existe dans les zones oxydées (mineraï oxydé) et les granodiorites sulfurées de forte teneur variant entre 2 et 3 g/T comme l'indique le sondage YRC0748 localisé à l'Ouest de la section 777435N. Au regard de tout ce qui précède, les facteurs contrôlant la minéralisation aurifère du prospect CMA-Nord du Yaouré sont liés en surface par l'altération supergène (mineraï oxydé) et en profondeur, par l'hydrothermalisme (mineraï sulfuré).

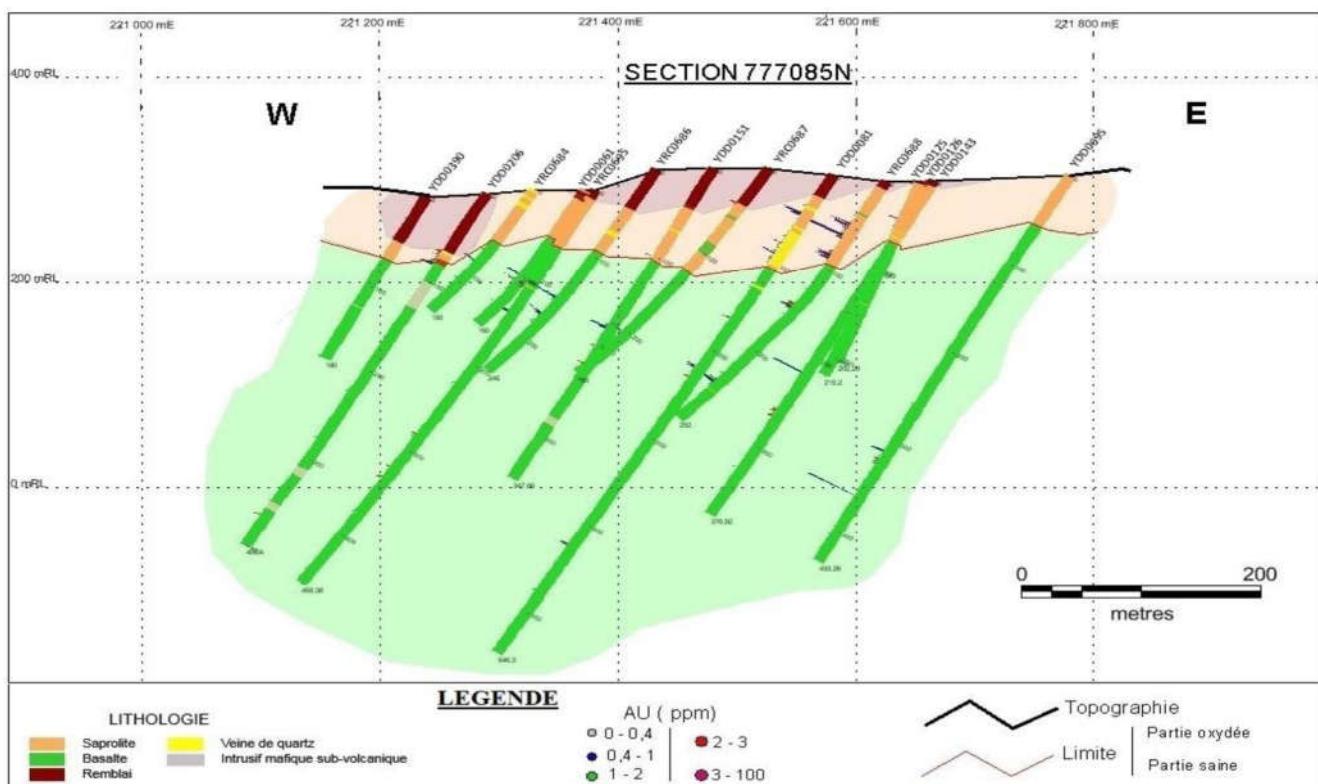


Figure 4 : Représentation de la section de sondages 777085N

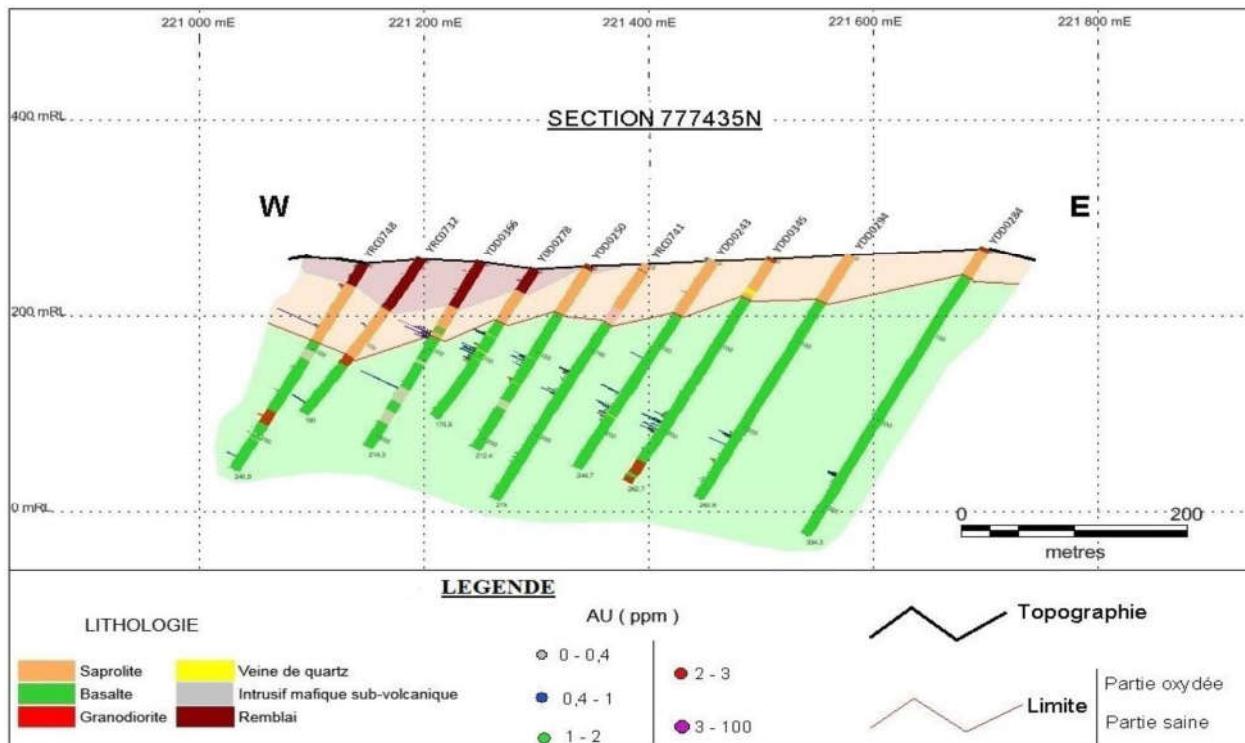


Figure 5 : Représentation de la section de sondages 777435N

4.2. Modèle de la minéralisation aurifère du prospect CMA-Nord

La **Figure 6** présente le résultat du modèle de la minéralisation aurifère du prospect CMA-Nord du Yaouré. La partie oxydée (superficielle) du minéral (en bleu) a une forme lenticulaire avec un pendage dirigé vers l'Est. Elle est faiblement épaisse, car par rapport à la taille du modèle, son épaisseur oscille entre 15 à 30 m. Cependant, lorsqu'on avance vers le Nord, plus la profondeur de son toit devient de plus en plus grande (**Tableau 1**). Quant à la partie sulfurée (en jaune doré), le modèle montre qu'elle présente une forme relativement régulière (épaisseur quasi-constante) avec un pendage très marqué vers l'Est. De plus, elle représente la partie la plus importante du minéral (**Figure 6b**) parce qu'elle est caractérisée par une forte puissance (plus de 200 m d'épaisseur). Tout comme la partie oxydée qui la recouvre, la profondeur de son toit est de plus en plus grande lorsqu'on s'oriente vers le Nord.

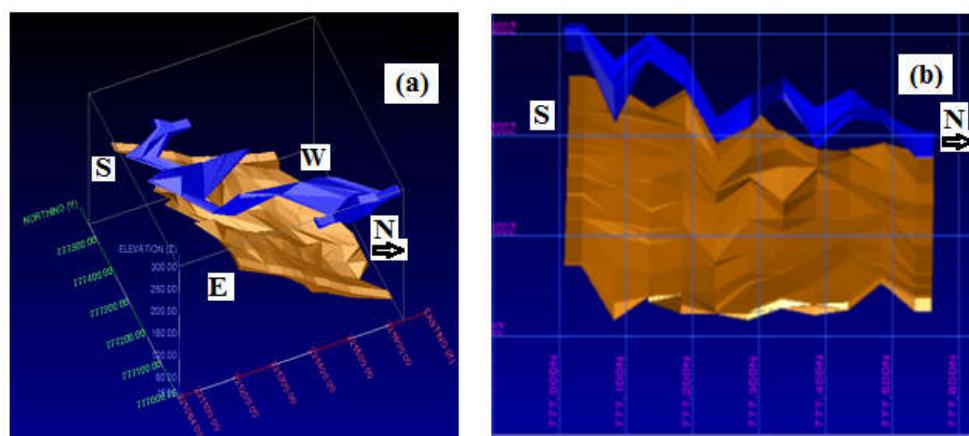


Figure 6 : Modèle de la minéralisation aurifère du prospect CMA-Nord du Yaouré ; (a) : vue en 3D ; (b) : vue en plan (2D)

Tableau 1 : Positions dans le sous-sol (début et fin) des deux parties minéralisées du prospect aurifère CMA-Nord du Yaouré

	Partie oxydée				Partie sulfurée			
	Début		Fin		Début		Fin	
	Point 1	Point 2	Point 3	Point 4	Point 1	Point 2	Point 3	Point 4
X (m)	221 420	221 634	221 221	221 314	221 222	221 314	221 117	221 533
Y (m)	777 036	777 035	777 534	777 533	777 039	777 533	777 531	777 529
Profondeur (m)	8	7,5	13	11	55	66	53	71

4-3. Estimation de la ressource aurifère du prospect CMA-Nord

Le **Tableau 2** est le résultat de l'estimation de la ressource aurifère du prospect étudié réalisée à partir des modèles de blocs finaux (parties oxydée et sulfurée). Distinctement, pour une teneur de coupure de 0,4 g/T, le minerai oxydé est caractérisé par une teneur en or d'une moyenne égale à 0,281 g/T pour un tonnage d'environ 240094. La quantité d'or obtenue est estimée à 2237 onces. Quant au minerai sulfuré, la teneur en or moyenne est de 0,695 g/T pour un tonnage d'environ 2039566. Au regard de tout ce qui précède, le prospect CMA-Nord du Yaouré renferme une importante quantité ressource aurifère, car le tonnage est estimé à plus de 2276660.

Tableau 2 : Ressource minérale aurifère

	Teneur de coupure (g/T)	Tonnage	Teneur en Au (g/T)	Au (g)	Au (once)
Partie oxydée	0,4	240 094	0,281	67 466	2 237
Partie sulfurée	0,4	2 039 566	0,695	1 417 498	46 999

5. Discussion

L'étude des différentes sections géologiques a permis de révéler que le sous-sol du prospect aurifère CMA-Nord du Yaouré est composé de basaltes, d'intrusifs mafiques sub-volcaniques indifférenciés et de granodiorites dont le tout est surmonté successivement par la saprolite et des remblais. Cette description est respectueuse de celle réalisée dans cette même localité par certains auteurs qui ont même démontré que les formations sub-volcaniques indifférenciées mises en évidence sont en réalité des formations sub-volcaniques à plutoniques composées de diorites, microgranites et microgabbros côtoyant d'autres roches volcaniques (rhyolites, dacites, rhyodacites, andésites) [6]. Sur le plan métallogénique, les études ont montré que ces formations sont minéralisées et dont l'ensemble correspond à un minerai aurifère qui est composé d'une partie superficielle oxydée renfermant généralement des veines de quartz minéralisées et d'une autre partie profonde sulfurée regorgeant des roches saines. L'association de l'or aux sulfures suppose un transport typique à celui dans les dépôts de type mésothermal [7]. Toutefois, cette minéralisation suggère que, dans la zone étudiée, le contrôle minéral est à la fois lié à l'altération supergène et à l'hydrothermalisme [8]. De plus, la présence des veines de quartz suppose un remplissage de failles par un fluide minéralisateur indiquant une mise en place dans un régime tectonique actif [9]. Ce qui soutient que la minéralisation aurifère est aussi contrôlée par la structurale [10]. Cette structurale est marquée d'une part par des déformations souples définies par des plis et des schistosités, et d'autre part, par des déformations cassantes (fractures, failles) [6] principalement orientées N-S à NNE-SSO [11]. Quant aux travaux de la modélisation, on a noté que le prospect étudié renferme une importante quantité de ressource aurifère, car le tonnage obtenu est estimé à plus de 2276660. Ces résultats montrent que la modélisation se propose être un outil de visualisation et d'interprétation très important pour la prise de décision [12] à toutes les échelles en exploration minérale.

Cependant, plusieurs limites découlent de sa réalisation et de son interprétation [13]. En effet, le processus de modélisation se caractérise par une incertitude qui est omniprésente tout au long du processus [14 - 16]. Celle-ci est due au fait que le modèle n'est pas déterminé à priori ; ce qui ouvre sur de multiples interprétations possibles d'une zone d'étude donnée. D'abord, la possibilité de mesurer directement les phénomènes représente un facteur limitatif de la modélisation géologique [17, 18]. De plus, il est difficile de faire une mesure complète et précise du volume de la minéralisation compte tenu de la complexité de la structure interne de la Terre [19 - 24]. Concernant l'estimation des ressources, les données calculées dépendent des ressources minérales indiquées. Ce qui suggère que les techniques d'estimation des ressources sont d'une certaine complexité nécessitant plusieurs approximations. En effet, les valeurs attribuées aux zones non échantillonnées peuvent s'avérer différentes de la réalité du sous-sol [25]. Ceci peut engendrer une surestimation des ressources. Enfin, la méthode géostatistique fournit en général des résultats proches de la réalité lorsque l'on a une forte distribution de valeurs [26]. La distribution des valeurs estimées est identique à celle des valeurs ponctuelles. Ce qui ne reflète pas la réalité, car elle néglige un facteur important : l'effet support [27]. Cette dernière lacune a été corrigée dans cette étude par l'utilisation du modèle de bloc qui fournit un cadre pour une bonne évaluation locale. Cela présente un modèle qui traduit aisément l'estimation [28].

6. Conclusion

Au terme de cette étude, on retient que ces travaux répondent à un besoin de compréhension de la minéralisation aurifère du prospect CMA-Nord du Yaouré. Cette minéralisation est associée à zone superficielle altérée correspondant au minéral oxydé et à des niveaux sulfurés profonds caractérisés par des basaltes, des intrusifs de roches mafiques sub-volcaniques et de granodiorites. Les facteurs qui contrôlent la minéralisation sont liés à l'altération supergène, à l'hydrothermalisme et à la structurale. Enfin, le modèle réalisé a permis de montrer que la partie du minéral oxydé a une faible épaisseur (moins de 30 m) par rapport à l'autre partie sulfurée qui est estimée à plus de 200 m de puissance. Les estimations ont montré que ce minéral présente de grands intérêts puisque sa quantité est évaluée à plus de 2276660 tonnes pour une teneur en or moyenne égale à 0,488 g/T. La modélisation serait donc un outil de visualisation et d'interprétation très important pour la prise de décision à toutes les échelles en exploration minière

Références

- [1] - J.-L MARK "Three-dimensional geological modelling of potential-field data", *Rev. Computers and Geosciences*, Vol. 27, N° 4 (2001) 455 - 465
- [2] - Q. WU et H. XU, "On three-dimensional geological modeling and visualization", *Rev. Science in China Series D : Earth Sciences*, VI. 47, N° 8 (2004) 739 - 148
- [3] - M. PERRIN, B. ZHU, J.-F. RAINAUD et S. SCHNEIDER, "Knowledge-driven applications for geological modeling", *Journal of Petroleum Science and Engineering*, Vol. 47, N° 2 (2005) 89 - 104
- [4] - M. APPEL, "From 3D geomodelling systems towards 3D geoscience information systems: Data model, query functionality and data management", *Rev. Computers & Geosciences*, Vol. 32, N° 2 (2006) 222 - 229
- [5] - B. KARINE, "La construction de modèles géologiques 3D à l'ère de la normalisation", Mémoire de Maîtrise, Université Laval, Québec, Canada, (2006) 141 p.
- [6] - B. G. KOFFI, G. OUATTARA, A. N. KOUAMELAN et J. P. DEROIN, "Étude pétro-structurale des volcano-plutonites des Monts du Yaouré : Contribution à la compréhension du contexte métallotectique de la minéralisation aurifère (Centre de la Côte d'Ivoire)", *Rev. International Journal of Innovation and Applied Studies*, Vol. 2, N° 4 (2013) 635 - 644

- [7] - A. C. COLVINE, A. J. ANDREWS, M. E. DUROCHER, A. J. FYON, M. J. LAVIGNE, A. J. MACDONALD, S. MARMONT, K. H POULSEN, J. S. SPRINGER et D. G. TROOP, "An integrated model for the origin of Archean lode gold deposits", *Ontario Geological Survey, Open File Report*, 5524 (1984) 98 p.
- [8] - E. B. J. C. AKA, L. N. KOUAMÉ, S. P. DJROH, Y. A. S. I. OBOUÉ, E. GAHÉ et B. C. SOMBO, "Contribution de la géophysique à l'étude de la minéralisation aurifère de Gouméré, Nord-Est de la Côte d'Ivoire : magnétométrie et polarisation induite", *Rev. Afrique Science*, Vol. 13, N° 6 (2017) 261 - 272
- [9] - M. BÉLANGER, "Contrôle structural et contexte métallogénique de l'indice aurifère Dorest, Péninsule de la baie verte, Terre-Neuve", Mémoire, Université du Québec INRS-Géoresources, Canada, (1995) 42 - 53
- [10] - E. B. J. C AKA, Étude géophysique par magnétométrie et polarisation provoquée des formations précambriques de la région de goméré (nord-est de la côte d'ivoire) : caractérisation lithostructurale et implication à la connaissance de la minéralisation aurifère. Thèse de Doct., Université Félix Houphouët-Boigny, Côte d'Ivoire, (2018) 191 p.
- [11] - K. AFFIAN, F. B. ANOH, E. V. DJAGOUA, M. ROBIN, M. C. AZAGOH, P. N'GUESSAN, M. B SALEY et J. BIÉMI "Contribution de la télédétection à la recherche de gisement d'or dans la région d'Angovia en Côte d'Ivoire", *Rev. Télédétection*, Vol. 4, N°3 (2004) 277 - 288
- [12] - G. COURRIOUX, S. NULLANS, A. GUILLEN, J. D. BOISSONNAT, P. REPUSSEAU et X. M. RENAUD, "3D volumetric modelling of Cadomian terranes (Northen Brittany, France): an automatic method using Voronoi diagrams", *Rev. Tectonophysics*, Vol. 1, N°2 (2001) 181 - 196
- [13] - E. J. COWAN, R. K. BEATSON, H. J. ROSS, W. R. FRIGHT, T. J. McLENNAN, T. R. EVANS, J. C. CARR, R. G. LANE, D. V. BRIGHT, A. J. GILLMAN, P. A. OSHUST et M. TITLEY, "Practical Implicit Geological Modelling", *5th International Mining Geological Conference*, 17-19 novembre 2003, Bendigo, Australie, (2003) 89 - 99
- [14] - B. KELK, "Three Dimensional Modelling with Geoscientific Information Systems", *Rev. Kluwer Academic Publishers*, N°12 (1992) 29 - 37
- [15] - A. KASSOU, M. AISSA et A. ESSAHLAOUI, "Modélisation numérique de la minéralisation polymétallifère du gisement de Tighza (Maroc central) par l'outil SIG et la géostatistique", *Rev. Afrique Science*, Vol. 7, N°1 (2011) 26 - 35
- [16] - A. H. GEMMOULA, "Caractérisation et Modélisation géologique du réservoir Cambro-Ordovicien d'une partie du champ de Hassi Messaoud (Zone 13)", Thèse de Doctorat, Université de Badji Mokhtar-Annaba, Algérie, (2016) 222 p.
- [17] - J. RAPER, "Multidimensional Geographic Information Science", *Rev. Springer London*, N°3 (2000) 282 - 300
- [18] - J. F. WELLMANN, M. DE LA VARGA, R. E. MURDIE, K. GEISSNER et M. JESSELL, "Uncertainty estimation for a geological model of the Sandstone greenstone belt, Western Australia - insights from integrated geological and geophysical inversion in a Bayesian inference framework", *Rev. Geological Society*, N°453 (2017) 426 - 463
- [19] - M. JESSEL, "Three-dimensional geological modelling of potential-field data", *Rev. Computers & Geosciences*, N°27 (2001) 455 - 465
- [20] - R. LI, G. WANG et E. CARRANZA, "GeoCube : A 3D mineral resources quantitative prediction and assessment system", *Rev. Computers & Geosciences*, N°89 (2016) 161 - 173
- [21] - A. S. HOYER, F. JORGENSEN et P. B. E. SANDERSEN, "3D geological modelling of a complex buried-valley network delineated from borehole and AEM data", *Rev. Journal of Applied Geophysics*, N° 122 (2015) 94 - 102
- [22] - J. VEGA, "Apport des modèles géo-métallurgiques et de la catégorisation des ressources à la définition de la fosse ultime d'une mine à ciel ouvert. Application à la mine de cuivre de Mantos de la Luna au Chili", Thèse de Doctorat, Université ParisTech, France, (2012) 204 p.

- [23] - J. L. MARTINEZ, M. RAIBER et D. I. CENDÓN, "Using 3D geological modelling and geochemical mixing models to characterise alluvial aquifer recharge sources in the upper Condamine River catchment, Queensland, Australia", *Rev. Science of the Total Environment*, Vol. 574, (2017) 1 - 18
- [24] - J. - L. MALLET, "Geomodeling applies mathematical methods to the topology, geometry, and physical properties of geological objects", *Rev. Oxford University Press*, New York, USA, Vol. 3, N° 2 (2002) 580 - 599
- [25] - L. M. DE VRIES, J. CARERRA, O. GRATACOS et L. J. SLOOTEN, "Application of multiple point geostatistics to no-stationary images", *Rev. Mathematical Geosciences*, Vol. 41, N° 1 (2009) 28 - 39
- [26] - H. WACKERNAGEL et W. TABBARA "Techniques géostatistiques pour l'interpolation spatiale à partir d'observations et de simulations numériques", *Revue de l'électricité et de l'électronique*, Vol. 2, N° 1 (2009) 44 - 109
- [27] - I. M. GLACKEN, D. V. SNOWDEN et A. EDWARDS, "Mineral resource and ore reserve estimation- the AusIMM guide to good practice" *Rev. The Australasian Institute of Mining and Metallurgy, Melbourne*, Vol. 3, N° 2 (2009) 189 - 198
- [28] - J. RIVOIRARD, "De l'analyse structurale à la modélisation des ressources naturelles : Contributions géostatistiques", Thèse de Doctorat, Université Pierre et Marie Curie-Paris 6, France, (2012) 27 - 65