

ÉTUDE STRUCTURALE DU GISEMENT D'URANIUM D'AKOLA ET RISQUES GÉOTECHNIQUES LIÉS À LA MÉTHODE D'EXPLOITATION DANS LA MINE DE LA COMINAK, NIGER

**Ibrahim WAGANI^{1*}, Maman Sani ABDOU BABAYE¹
et Alhassane ILLIAS²**

¹ *Université Dan Dicko Dankoulodo de Maradi, Faculté des Sciences et Technique, Département de Géologie, BP 465, Maradi, Niger*

² *Université d'Agadez, Faculté des Sciences et Technique, Département de Géologie, BP 199, Agadez, Niger*

* Correspondance, e-mail : waganib@yahoo.fr

RÉSUMÉ

Cette étude porte d'une part, sur la caractérisation des structures tectoniques du gisement d'Akola et leur genèse dans le contexte géodynamique régional, et d'autre part, améliorer les méthodes qui permettent de renforcer la stabilité de l'exploitation en mine souterraine. Les types de fractures observées ont des orientations très variables dont les principales sont: N140 à N170, N100 à N120, N40 à N50 et les N60, N70 à N80. Après une analyse structurale détaillée de la tectonique globale du Bassin de Tim Mersoï et celle du gisement d'Akola, des relations se sont dégagées. Le réseau de fracture de direction N170 à N140 est lié à l'accident NS d'Arlit car ces fractures présentent des rejets liés à la tectonique du socle. Les fractures sans rejet N40 à N50 sont aussi une conséquence des jeux de la faille d'Arlit, mais ici en décrochement senestre ayant entraîné la formation de certaines structures plissées. Le réseau de fracturations N60, N70 à N80 a une histoire tectonique très différente des précédents car il est lié au faisceau régional de Tin Adrar de direction N70. Ces structures sont majoritairement responsables des risques géotechniques et des accidents graves liés à la chute des blocs lors des travaux miniers. Les résultats de cette étude constituent une base de données nécessaire à la poursuite des travaux de recherche surtout concernant la modélisation numérique des fractures pour prédire les zones à risques.

Mots-clés : *structurale, géotechnique, exploitation, uranium, Akola, Niger.*

ABSTRACT**Structural study of the Akola uranium deposit and geotechnical risks related to the operating method from the Cominak mine**

This study deals, on the one hand, with the characterization of the tectonic structures of the Akola deposit and their genesis in the regional geodynamic context, on the other hand, to improve methods that enhance the stability of underground mining operations. The types of fractures observed have very variable orientation whose main ones are: the N140 to N170, the N100 to N120, the N40 to N50, the N60, and the N70 to N80. After a detailed structural analysis of the Tim Mersoï basin global tectonics and that of the Akola deposit, the following relationships have emerged: the N170 to N140 fracture network is related to the Arlit NS fault because these dip-slip faults are related to the basement tectonics. The N40 to N50 strike-slip fractures derived also from the movement of the Arlit fault but in senestral strike-slip movement here. The tectonic history of the N60, N70 and N80 fracturing network is very different from the previous ones because it is related to the Tin Adrar regional tectonic setting of N70 trend. These structures are mainly responsible for the geotechnical risks and serious accidents related to the falling of the blocks during the mining works. The results of this study constitute a database necessary for the continuation of the research work especially concerning the numerical modeling of the fractures to predict risk areas.

Keywords : *structural, geotechnical, mining, uranium, Akola, Niger.*

I - INTRODUCTION

Le Niger regorge d'innombrables ressources minières parmi lesquelles l'Uranium constitue la principale ressource actuellement en exploitation. C'est d'ailleurs ce qui place le Niger parmi les 5 premiers pays producteurs d'Uranium à travers le monde. L'exploitation du gisement d'AKOLA se fait en mine souterraine suivant la méthode des chambres et piliers avec remblayage. Cette méthode d'exploitation engendre d'important vide qui peuvent être à l'origine des affaissements et des effondrements en surface. L'amplitude de ces catastrophes dépend de nombreux facteurs parmi lesquels la géologie du gisement surtout son aspect lithologique et structural [1, 2]. Le gisement d'Akola est localisé dans un compartiment délimité par trois structures majeures : l'accident NS d'Arlit à l'Ouest, le faisceau N70° de Tin Adrar au Nord et l'accident N30° de Mouron au Sud-est. La formation gréseuse du Guézouman d'âge Carbonifère et appartenant à la série sédimentaire de Tagora est celle qui contient les minéralisations uranifères. Comme toutes les méthodes d'exploitation utilisées de nos jours, celle utilisée par la Cominak

rencontre également beaucoup de difficultés. Parmi celles-ci les plus importantes sont liées aux risques géologiques et géotechniques. Dans le cas du gisement d'Akola, Il s'agit de la présence d'une très forte densité de fractures dans les galeries qui rendent compliqués les travaux d'exploitation. Beaucoup d'accidents sont liés à ce phénomène de fracturation qui entraîne le plus souvent la chute des blocs rocheux. La chute de terrain dans les mines souterraines est, encore aujourd'hui, une cause importante d'accidents mortels et d'autres accidents graves [3]. Une connaissance aussi complète de la fracturation naturelle des massifs rocheux est fondamentale pour, au préalable, évaluer les risques et les types d'instabilités auxquels elle peut donner lieu dans les excavations à ciel ouvert et souterraine, et dans un second temps, définir les mesures à prendre pour y faire face et assurer ainsi la sécurité des chantiers [4]. Plusieurs travaux ont également mis en évidence la présence de ces fractures dans le gisement. La proximité du gisement de la faille d'Arlit se fait ressentir par une fracturation importante avec des rejets de l'ordre du mètre par endroit [5]. Des accidents structuraux orientés E-W à E-NE-W-SW ont été observés et le jeu continu de ces accidents aboutit à la fragmentation de la série détritique rigide surincombante. Ainsi se forment des blocs basculés dans un contexte distensif par le jeu de failles listriques [6]. Des failles normales ont été observées dans les quartiers 36 et 37, dont le rejet affecte la base des grès du Guézouman et visible à l'affleurement sur les parements de galeries [7]. L'extension verticale de ces failles est impossible à préciser, étant donné l'échelle verticale d'observation. Ces failles ont un rejet variable, compris entre la dizaine de centimètres et plusieurs mètres. De nombreux auteurs ont mis en évidence la présence de fractures, mais ces dernières n'ont pas été mesurées de façon systématique dans le but de dégager leur lien avec les risques géotechniques apparus pendant les travaux d'exploitation du gisement. Les travaux de recherche menés dans le cadre de cette étude, visent d'une part à améliorer les méthodes d'évaluations de la stabilité de l'exploitation en mine souterraine du gisement d'Akola par une meilleur prise en compte de la fracturation des terrains et, d'autre part, à contribuer au développement de moyen de soutènement appropriés.

II - MATÉRIEL ET MÉTHODE D'ÉTUDE

II-1. Présentation de la zone d'étude

Le gisement d'uranium d'Akola est Situé dans la partie nord désertique de la république du Niger plus précisément dans le bassin sédimentaire de Tim Mersoï (*Figure 1*). Ce dernier est limité à l'ouest par la dorsale d'In Guezzam et à l'Est par le massif de l'Aïr. Au Nord ce bassin prend le nom de synclinal

de Tim Séririne et s'étend dans le massif du Hoggar jusqu'en Algérie [9]. Le gisement d'uranium d'Akola fait parti de la région d'Arlit entre le méridien 6° et 8° Est, et en latitude depuis le parallèle 18° Nord jusqu'au parallèle 16° Nord. Les précipitations moyennes annuelles sont faibles (entre 100 et 300 mm, dans le massif de l'Aïr et 40 mm dans les plaines) et s'étalent entre juin et septembre. Le réseau hydrographique de cette région désertique ne connaît pas de cours d'eau permanent ; il est surtout composé de korys (cours d'eau non permanent).

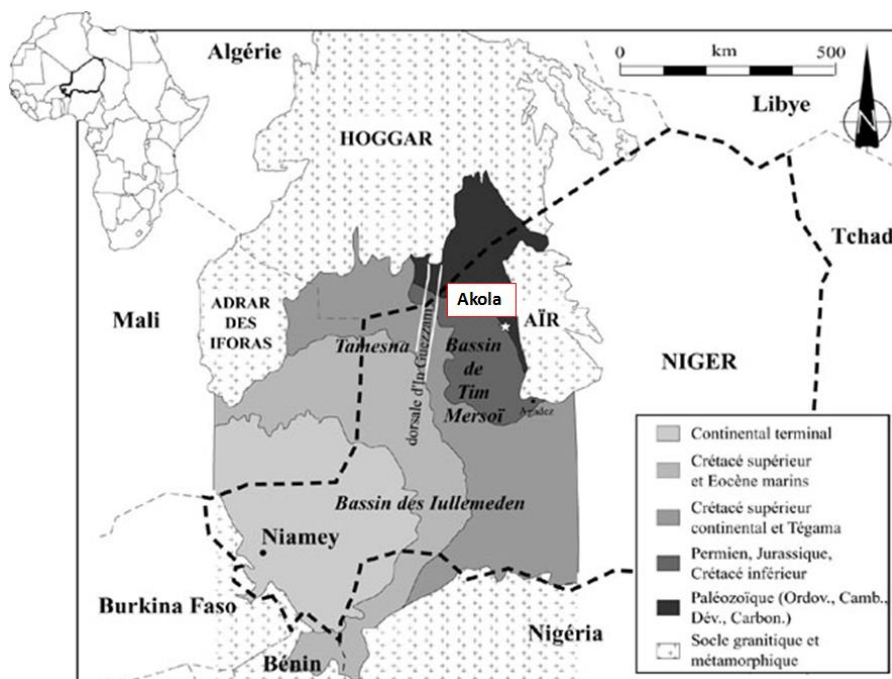


Figure 1 : Localisation du secteur minier d'Akola [11]

II-2. Contexte géologique et structurale

Le fond géologique du Niger est donc essentiellement constitué par un socle précambrien où prédomine le granite, et par des sédiments continentaux gréseux et argileux qui se sont déposés du primaire au tertiaire [10]. Ce fond disparaît fréquemment sous les alluvions quaternaires des vallées fossiles. Ces sédiments continentaux sont répartis dans plusieurs bassins sédimentaires dont celui de Tim Mersoï qui couvre toute la région d'Arlit qui est notre zone d'étude. Ce bassin contient l'ensemble des gisements d'uranium connus au Niger à ce jour. Les formations géologiques qui constituent le bassin de Tim Mersoï sont regroupées en plusieurs séries sédimentaires décrites comme suit (**Figure 2**) [11] :

- la série de Terada qui repose en discordance sur le socle structuré au Panafricain. Elle est composée par des grès, des conglomérats et des argilites [11].

- La série de Tagora marque à sa base un passage à une sédimentation de type fluvio-deltaïque qui durera du Carbonifère supérieur jusqu'au Permien. Les gisements du secteur d'Arlit sont tous localisés dans les grès de la série de Tagora contrairement aux gisements d'Imouraren [13] ;
- La série d'Izegouandane qui est constituée par des grès fluviaux surmontés par des épandages grés-argileux fluvio-lacustres [10] ;
- La série d'Aguelal formée par les grès du Téloua 1, qui sont des grès fins déposés dans un environnement continental désertique (éolien) ;
- la série de Goufat constituée par des grès feldspathiques (Téloua 2), surmontés par des grès bariolés (Téloua 3), puis par un terme argileux à intercalations conglomératiques (Mousseden). L'environnement de dépôt est fluvio-lacustre. La présence de galets de rhyolite et d'analcime dans les dépôts atteste de la pérennité de l'activité volcanique [10] ;
- la série de Wagadi caractérisée par des dépôts d'origine fluvio-lacustres constitués par des grès grossiers et des argilites, très riches en analcime (grès à analcimes et niveaux d'analcimolites), confirmant l'existence d'une activité volcanique, contemporaine de la sédimentation [14] ;
- La série de Dabla est constituée de grès, de silts argileux, d'argilites et d'analcimolites. Les gisements de la zone centre situés au sud du secteur d'Arlit sont situés dans cette série. Parmi ceux, on peut citer les gisements d'Imouraren situés dans les grès du Tchirezerine II.

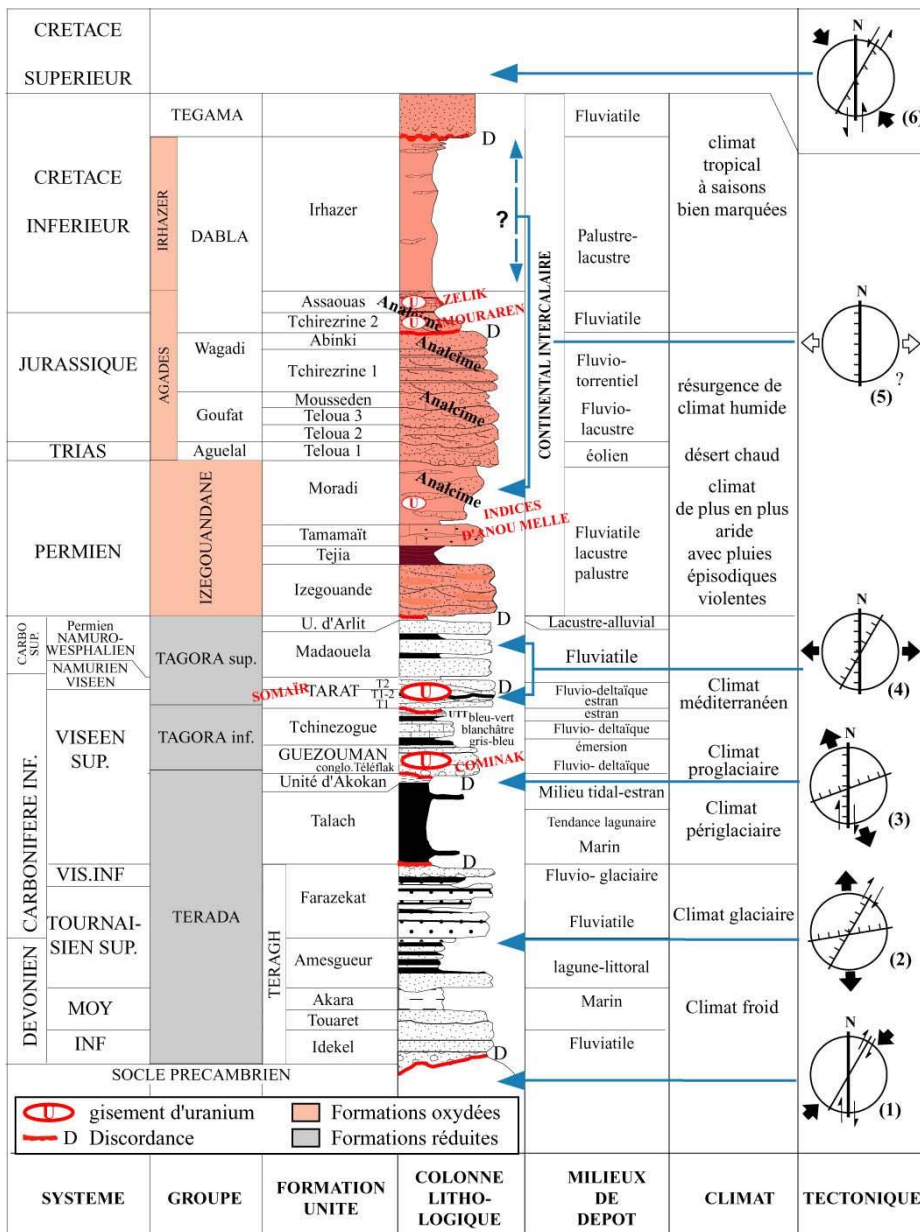


Figure 2 : Colonne litho-stratigraphique des formations du bassin de Tim Mersoï associée aux milieux de dépôt [11] et aux phases tectoniques [7]

La structuration du bassin de Tim Mersoï est dictée par une tectonique de revêtement où les accidents panafricains du socle, de direction NS (faille d'Arlit), N140, N70 et N30-40 sont relayés dans la couverture sédimentaire (Figure 3). Celle-ci est ainsi caractérisée par des déformations souples (flexures, plis d'entraînement), mais aussi par des accidents cassants [1, 9]. Ces structures

par la mine sur papier millimétré et à grande échelle (1/100) d'une proportion de la galerie de 18m de long (dans le cas de pilier 18x18m), appelé parement. Le levé de front consiste à lever une portion réduite d'un parement ne dépassant pas 6m de largeur et à caler les mesures radiométriques réalisées sur ce front à la faveur du radiocarottage des trous de mine d'abattage. Le levé géologique du front n'est pas aussi précis que le levé de parement. L'opérateur dessine sur papier millimétré préétabli à l'échelle 1/50 [8]. Toutes les structures tectoniques (failles, fractures, plis, ravinement, etc.) et sédimentologiques (lithologie, zones d'oxydoréduction et de lessivage, etc.) observées et mesurées seront reportées sur ces levés de parement dans le but d'améliorer régulièrement le modèle géologique du gisement. L'exploitation du gisement d'AKOLA par la société Cominak se fait suivant la méthode des chambres et piliers avec remblayage. Elle permet d'atteindre un taux de défrèvement de 100 %, en remblayant avec du remblai cimenté et du remblai stérile. L'exploitation par la méthode des chambres et piliers s'effectue en deux phases : Dans une première phase, Traçage (**Figure 4**), qui consiste à tracer des galeries de 6 m de large et de 2,5 à 3,5 m de hauteur, distantes d'axe en axe de 24 mètres, ce qui délimite ainsi des piliers carrés de 18 mètres de côté. Le traçage des galeries permet d'exploiter environ 40 % du minerai contenu dans le gisement. Les 60% sont contenus dans les piliers. Dans une deuxième phase, *Dépilage* (**Figure 5**) les piliers sont ensuite refendus, les galeries ouvertes remblayées à l'aide d'un remblai cimenté acheminé au fond de la mine par gravité depuis le jour. Les piliers résiduels sont exploités. Les vides ainsi créés sont partiellement comblés par autoremblayage.

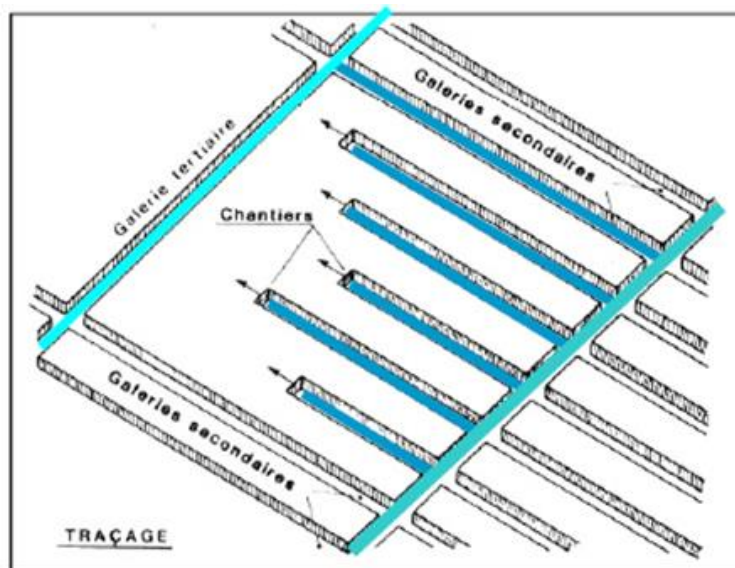


Figure 4 : Plan de traçage par la méthode de chambre et pilier

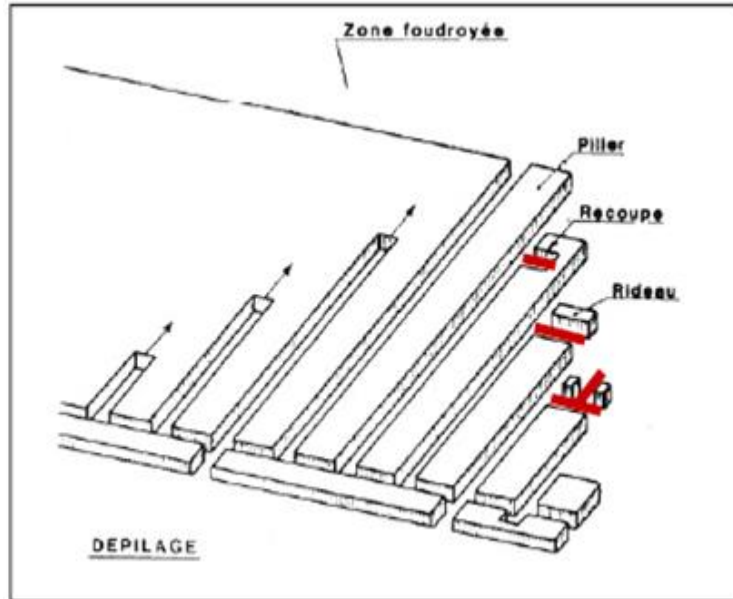


Figure 5 : Plan de dépilage par la méthode de chambre et pilier

III- RÉSULTATS

Les cartes des isohypses et des isopaques (*Figure 6*) des principales formations géologiques permettent de définir un certain nombre de domaines sédimentaires. Les limites de ces domaines représentent des flexures correspondant à des zones d'épaississement ou d'amincissement rapides et sont la trace de failles de socle s'amortissant dans la couverture sédimentaire.

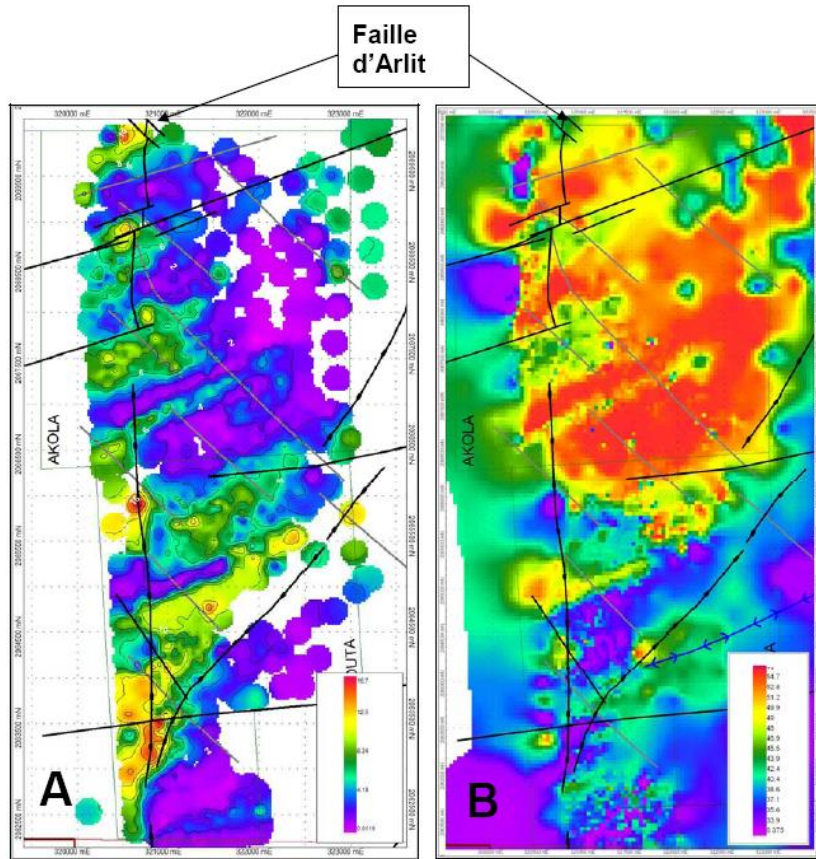


Figure 6 : Carte des isopaches des formations carbonifères sur Akola et Akouta (A - Unité d'Akokan et B - Unité d'Akola)

Les éléments structuraux déterminés au quartier 37 (Q37) du gisement d'Akola se présentent sous forme de failles et de diaclases. Certaines failles montrent des variations de niveaux sédimentaires. Les rejets de ces failles sont variables d'une zone à l'autre et sont généralement de quelques centimètres et exceptionnellement quelques mètres. Dans l'ensemble plus de 200 mesures ont été réalisées à travers les galeries de la mine au quartier 37 (**Tableau 1**). Après un traitement statistique de ces données et leurs représentations graphiques sur un histogramme, quatre groupes se dégagent (**Figure 7**) :

- Des fractures subverticales de direction variant entre N140 à N170
- Des fractures subverticales de direction variant entre N100 à N120
- Des fractures subverticales de direction variant entre N40 à N50
- Des fractures subverticales de direction variant entre N60, N70 et N80

Tableau 1 : données des mesures structurales prises au quartier 37

Direction	Pendage	Direction	Pendage	Direction	Pendage	Direction	Pendage
180	90	180	90	150	12	170	88
180	87	180	79	165	40	170	87
180	72	170	82	165	88	170	83
150	78	60	70	40	82	176	90
140	75	60	80	40	83	70	79
140	72	60	83	40	65	70	86
140	65	70	84	40	79	70	24
20	75	70	82	130	85	170	82
20	70	70	60	130	88	170	75
10	80	70	75	130	70	160	75
10	81	165	75	130	49	160	88
160	35	167	29	150	60	160	50
160	67	165	40	155	90	167	40
50	86	165	51	150	46	160	75
50	78	150	67	150	67	160	58
50	72	157	18	157	18	160	65
50	86	150	46	160	89	155	75
50	51	154	14	160	56	150	90
125	90	155	17	160	16	155	72
124	85	160	72	150	77	153	85
113	85	165	75	155	90	150	60
110	85	160	72	158	21	155	90
115	29	142	90	150	78	150	46
145	85	145	47	114	15	104	15
40	65	140	31	112	86	90	90
40	80	140	67	107	80	94	24
40	81	130	70	100	88	165	48
40	80	135	55	100	83	167	40
149	58	80	81	105	68	160	79
40	70	70	83	70	88	123	21
40	66	70	72	70	82	125	57
40	70	70	87	70	20	70	78
40	70	75	87	70	73	167	29
40	83	70	88	70	78	165	40
70	81	70	72	70	90	50	82
70	79	10	80	70	84	50	85
70	82	10	65	60	88	50	60
70	87	10	71	60	75	50	80
70	82	10	51	60	80	50	80
70	75	10	80	50	65	50	72
70	81	60	79	50	65	144	86
40	80	60	88	50	87	149	58
40	67	60	60	50	87	40	64
40	70	140	87	50	30	40	70
40	88	144	76	50	80	40	70

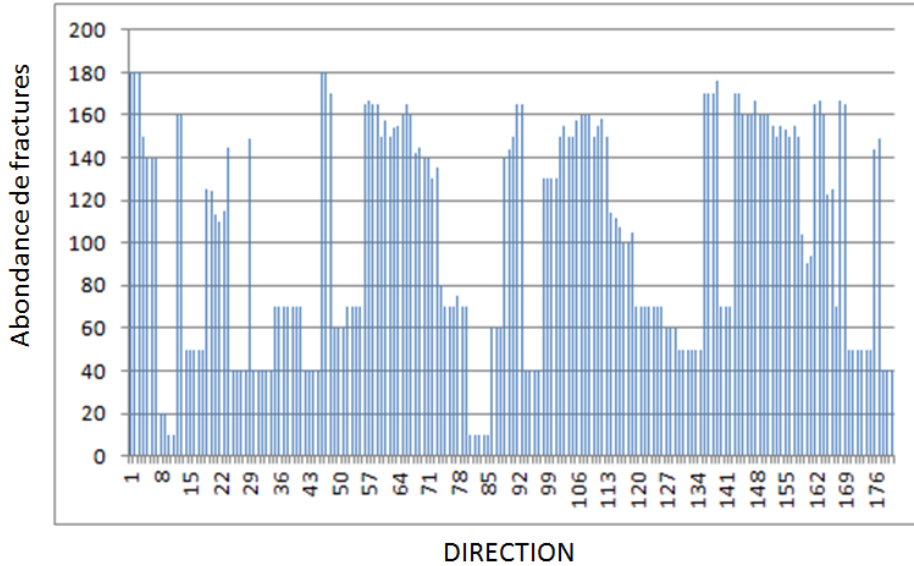


Figure 7 : Histogramme de fréquence des fractures au quartier 37

En ce qui concerne la rosace des directions (**Figure 8A**) non corrigées de l'ensemble de ces fractures, on a une prédominance des fractions de direction N60-70° et N70-80°, N160-170° et N170-180° et des fractures moins abondantes dans les directions N40-50° et N150-160°. Sur le stéréogramme de la **Figure 8B** apparaissent les pôles suivants dans l'ordre de densité (sans pondération de Terzaghi) :

- A : N70-20°SSE B : N70-40°SSE C : N150-85°W
- D : N170-80°W

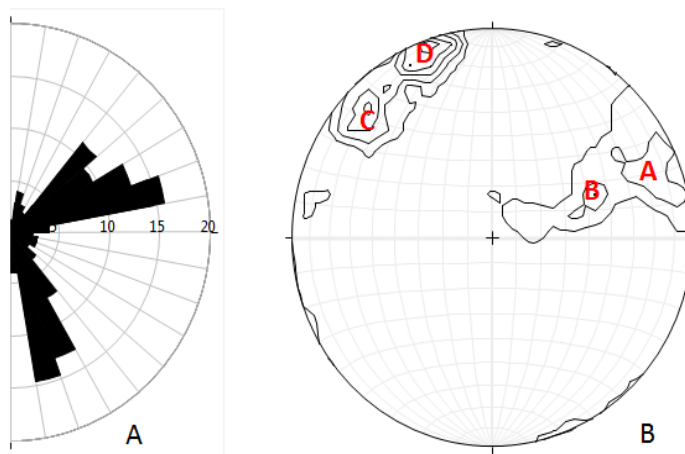


Figure 8 : Rosace directionnelle (A) et stéréogramme des fractures au Q37 (B)

IV - DISCUSSION

Les éboulements sont les accidents les plus fréquents de l'exploitation des mines souterraines. Ce type d'accident menace l'intégrité physique des mineurs et s'expriment sous forme de chute de bloc qui tombe du toit, cuvelage qui cède, front de taille qui s'écroule, galerie qui s'écrase. Tous ces phénomènes ont été observés dans la mine souterraine de la Cominak, particulièrement au quartier 37 du gisement d'Akola du fait de sa proximité de la faille principale d'Arlit. Pour assurer la stabilité d'une excavation souterraine et éviter les accidents, il faut avoir une bonne connaissance du massif rocheux en faisant des études, des mesures sur le terrain et en observant le comportement du massif rocheux en cours d'exploitation [16, 17]. Dans le cadre de sa politique d'évaluation des risques, la cause et l'identification de ces derniers a été mise au premier plan par la société exploitante. Notre étude rentre dans ce cadre avec comme principale objectif une étude détaillée des structures tectoniques responsables des éboulements. Il existe des exemples d'études semblables comme celui de la mine de plomb du Pontet en France [18] et une étude sur la perception du risque de la mine de Abitibi-Témiscamisque au Canada [19]. La structuration du bassin de Tim Mersoï est liée à un découpage du socle, hérité de l'orogénèse panafricaine. Cette structuration se caractérise par de grands accidents de direction N-S (faille d'Arlit), et par un découpage secondaire suivant un réseau NNE-SSW et ENE-WSW, issu de la réactivation de structures de socle créées au Panafricain supérieur, lors du fonctionnement en décrochement dextre des accidents N-S [5, 7, 20]. Les accidents du socle qui agissent sur la couverture sédimentaire sont généralement décrits comme des déformations souples, se manifestant soit par des flexures avec un rejet vertical, soient comme des plis d'entraînement [7, 14, 21]. Le style cassant dans la couverture du bassin de Tim Mersoï est essentiellement décrit comme des accidents décrochant, et notamment ceux du réseau N70° [10]. Les accidents majeurs qui déterminent la tectonique du Bassin de Tim Mersoï sont les suivants (*Figure 9*) :

- *Les accidents NS*

L'accident d'Arlit - In Assaouas, continu sur plusieurs centaines de kilomètres, sépare deux grands domaines panafricains. Il contrôle régionalement la distribution spatiale des gisements d'uranium économiques connus au Niger. Dans la couverture, il s'agit d'un accident mixte qui est à la fois souple (flexure) et cassant (zone faillée) [7, 10]

- *Les accidents N30°*

Les accidents du réseau N30° sont les structures les plus notables visibles à l'affleurement dans le bassin de Tim Mersoï. Dans la couverture, la déformation se caractérise par des flexures qui accommodent un rejet vertical parfois important (100-200 m). Selon [23]. Ces flexures sont liées à des jeux inverses – décrochant senestres des accidents de socle (régime compressif) [7].

- *Les accidents N70°-N80°*

Le réseau N70° se caractérise par des accidents d'importances majeures, tels que le faisceau de Tin Adrar et le faisceau de Tagayt [7]. Ces faisceaux auraient, selon [23] joué un rôle structural majeur à l'échelle du bassin, en localisant des décrochements dextres de grande ampleur (mouvements horizontaux d'échelle plurikilométrique). C'est particulièrement pendant la sédimentation que les accidents tectoniques ont joué à plusieurs reprises. Ce phénomène est marqué par les variations d'épaisseur des niveaux sédimentaires constatées au niveau de certaines failles observées au quartier 37 [9]. Un réseau de fractures de direction N170, N160° à N140° apparaît dans la partie Ouest du secteur Q.37 (failles normales, diaclases). Ces déformations sont liées à la présence de l'accident d'Arlit, et sont attribuées à l'extrémité orientale de la zone de faille. Ces fractures présentent des rejets et sont liées à la tectonique du socle. L'impact de la proximité de cette faille apparaît clairement dans les galeries ouest du secteur Q.37, et se manifeste par un léger basculement des unités stratigraphiques (sommets de l'Unité d'Akola et base du Guézouman). Le pendage atteint environ 10-15° au niveau des galeries N6 et N7, ce qui contraint la limite du gisement dans sa partie occidentale (problèmes d'exploitation liés à une pente trop forte) [7].

Les fractures N30, N40 à N50 sont aussi une conséquence des jeux de la faille d'Arlit, mais ici il s'agira plus précisément d'un décrochement senestre ayant entraîné la formation de certaines structures plissées. C'est ainsi qu'on obtient des plis parasites N30 et des plis d'entraînement N45 en fonction de l'intensité du décrochement. Ces fractures ne présentent pas de rejet comme les précédentes et sont liées à la tectonique de la couverture sédimentaire. Les conséquences des structures tectoniques régionales sur la zone de gisement ont été déjà observées sous forme d'accidents N30-40° [24]. Quant au réseau de fracturations N60, N70 à N80 mesuré dans le quartier 37 il a une histoire tectonique très différente et il n'est qu'une conséquence du faisceau N70 de Tin Adrar. La densité de ces réseaux de fracturation augmente vers l'ouest dans le quartier 37. De ce fait, la conjugaison du faisceau de Tin Adrar, la déformation cassante résultant de la flexure de Mouron tous très proche du quartier 37 et les effets de la flexure faille d'Arlit sont comme seule cause de l'apparition des nombreuses cassures et diaclases observées dans cette partie du gisement d'Akola. A partir des résultats de notre étude sur les facteurs à risques qui sont les structures tectoniques, il est possible de prédire les zones très exposées et de proposer des solutions en fonction de la nature du terrain et de l'orientation de ces structures. Des travaux sur la mise en sécurité des puits de mine, propose dans des situations pareilles des essais géomécaniques qui consiste à déterminer des niveaux qui présentent des caractéristiques mécaniques faibles (terrains superficiels, terrain fracturés ou faillés, terrains saturés en eau)

et donc, qui mettent en cause la stabilité des terrains [25]. Des recherches ont été réalisées sur les effets de l'endommagement des roches sur la stabilité des excavations souterraines très profondes [26]. Dans ce cas-ci, les scientifiques proposaient d'appliquer un modèle d'endommagement aux cas d'excavations en roches dures soumises à de fortes contraintes, en fonction d'un critère de rupture tridimensionnel qui permet d'introduire les effets du temps et de l'échelle. Ils ont évalué sa validité au moyen de calculs et constitue un outil de prévision plus sécuritaire, qui permet de mieux évaluer les besoins de soutènement et donc, de réaliser une meilleure conception des excavations minières souterraines [35]. Parfois aussi la méthode d'abatage par foudroiement de la roche à la dynamite accentue l'ouverture des fractures qui entraînera la chute des blocs. Pour résoudre ce problème une étude de l'effet du sautage adouci sur la fracturation des parois d'une excavation souterraine a été réalisée avec des résultats très encourageants [27].

V - CONCLUSION

Cette étude permet d'identifier et de caractériser les structures tectoniques majeures du gisement d'Akola d'une part, et de l'autre, a bien connaître leur origine dans le contexte géodynamique régionale. Les fractures N170, N160 sont rattachées au système de la flexure faille d'Arlit ayant joué dans un premier temps en mouvement verticale normale. Les fractures N60, N70 sont liées au faisceau de Tin Adrar de direction N70. Cette étude confirme que ces structures tectoniques sont majoritairement responsables des problèmes géotechniques ayant causé des accidents graves lors des travaux miniers. Au vue de la densité des fractures, la méthode de soutènement du toit des galeries par l'utilisation des boulons s'avère inefficace. Dans ce cas, il est important de revoir la maille de fixation des boulons qui sera couplée à l'utilisation de grillage. D'autres travaux sur la géophysique et la modélisation numérique des réseaux de fractures devraient être envisagés pour ainsi délimiter de façon précise les zones à risques potentiels.

RÉFÉRENCES

- [1] - R. NEKACHE, Etude de la stabilité des mines souterraine par les méthodes numériques. Mémoire de Magister en Mines de l'université Badji Mokhtar Annaba, (2012) 111 p.
- [2] - A. H. MOHAMED MARWAN, Les nouvelles méthodes de modélisation numérique et le volume d'influence des exploitations minières en conditions complexes. Thèse de Doctorat de l'institut national Polytechnique de Lorraine, (1993) 380 p.
- [3] - R. SIMON, Etude de l'effet du sautage adouci sur la fracturation des parois d'une excavation souterraine, Rapport R-310, (2002) 65 p.
- [4] - R. J. PINE et F. WOJTKOWIAK, Stabilité et confortement d'ouvrage minier. Rapport BRGM n° R33442 4S GEG. Vol. 1, (1991) 98 p.
- [5] - P. FORBÈS, Rôles des structures sédimentaires et tectoniques, du volcanisme alcalin régional et des fluides diagénétiques-hydrothermaux pour la formation des minéralisations à U-Zr-Zn-V-Mo d'Akouta (Niger), thèse de doctorat, CREGU, Nancy, (1989) 375 p.
- [6] - M. YAHAYA and J. LANG, Tectonic and sedimentary evolution of the Akokan Unit during Visean times in the Tim Mersoï Basin (Arlit region, Niger). *Journal of African Earth Sciences*, 31 (2) (2000) 415 - 431
- [7] - O. GERBEAUD, Evolution structurale du bassin de Tim Mersoï : rôle des déformations de la couverture sédimentaire sur la mise en place des minéralisations uranifères du secteur d'Arlit (Niger). Thèse Université Paris Sud, (2006) 260 p.
- [8] - I. WAGANI, Tectonique du bassin de Tim Mersoï, levé et synthèse de la fracturation au quartier 37 du gisement d'Uranium d'Akola-Arlit (Niger), (2002) 51 p.
- [9] - M. YAHAYA, Dynamique sédimentaire du Guézouman et des formations viséennes sous-jacentes en liaison avec la tectonique, le volcanisme et le climat paléomilieux des gîtes uranifères d'Arlit (Niger). Thèse Doctorat 3^{ème} cycle, Université de Dijon, (1992) 357 p.
- [10] - C. VALSARDIEU, Etude géologique et paléogéographique du bassin de Tim Mersoï, région d'Agadès (République du Niger). Thèse de doctorat, université de Nice, (1970) 518 p.
- [11] - R. COQUEL, J. LANG and M. YAHAYA, Palynologie du Carbonifère du Nord Niger et de la plate-forme saharienne - implications stratigraphiques et paléogéographiques. *Review of Palaeobotany and Palynology*, 89 (1995) 319 - 334
- [12] - T. SEMPÈRE, Le contexte sédimentaire du gisement d'uranium d'Arlit (République du Niger). Thèse de doctorat, ENSMP, Paris, (1981) 382 p.
- [13] - T. SEMPÈRE, B. BEAUDOIN, Discontinuités et séquences dans la formation de Tarat (Viséen supérieur) et l'unité d'Arlit (Namuro-Westphalien) à Arlit (Niger). Evolution sédimentaire, climatique et tectonique de la région au Carbonifère. *Bulletin de la Société Géologique de France*, 296 (1984) 995 - 1014
- [14] - I. WAGANI, Potentialité uranifère des sources volcaniques envisageable pour la formation des minéralisations de la région d'Arlit (Niger). Thèse de Doctorat de l'Université Paris-Sud, (2007) 283 p.

- [15] - J. CLERMONT, M. YAHAYA, J. LANG and O. JAMES, Un bassin paléozoïque et mésozoïque en décrochement : le Tim Mersoï dans la région d'Arli, à l'Ouest de l'Aïr (Niger). *Compte rendu de l'Académie des Sciences de Paris*, 312-II (1991) 1189 - 1195
- [16] - R. YAWAVI AND N. TOUGNON, Risques des projets d'exploitation des ressources minières et énergétiques : cas des carrières de concassage de roches en moellons et graviers concassés. *Rapport du Secrétariat internationale francophone pour l'évaluation environnementale*. Togo, (2013) 20 p.
- [17] - M. BENNANI, J. P. JOSIEN and P. BIGARRE, Surveillance des risques d'effondrement dans l'après-mine: apport de la microsismique. *Revue Française de Géotechnique*, N° 106-107 (2003) 5 - 14
- [18] - J. L. FEYBESSE, Étude géologique et structurale de la mine de plomb du Pontet (Isère): nouvelles données sur la métallogénie alpine apportées par les expertises en appui aux politiques publiques de mise en sécurité et d'étude archéologique des concessions minières orphelines. BRGPURP-50633-FR, 4 cg., 16pl., (2000) 74 p.
- [19] - S. BEAUPRE, La perception du risque sous terre : l'exemple des mineurs de fond de l'Abitibi-Témiscaminque. Thèse présentée à la Faculté des arts et des sciences en vue de l'obtention du grade de Phd. en sciences humaines appliquées, (2011) 190 p.
- [20] - J. P. LIEGEOIS, L. LATOUCHE, M. BOUGHARA, J. NAVES and M. GUIRAUD, The LATE metacraton (Central Hoggar, Tuareg shield, Algeria) : behavior of an old passive margin during the pan African orogeny. *Journal of African Earth Sciences*, 37 (2003) 161 - 190
- [21] - P. TAUZIN, Cadre géologique des gisements d'uranium de la bordure orientale du bassin de Tim Mersoï. *Rapport interne COGEMA*, (1981) 26 p.
- [22] - R. GUIRAUD, B. OUSMANE and J. P. ROBERT, Mise en évidence de déformations traduisant un raccourcissement dans le Mésozoïque de la périphérie de l'Aïr (Niger). *Compte rendu de l'Académie des Sciences de Paris*, 282-II (1981) 753 - 756
- [23] - G. HIRLEMANN and J. P. ROBERT, Analyse structurale du permis minier Imouraren. CEA GAM, (1980)
- [24] - J. GREIGERT and R. POUUNET, Essais de description des formations géologiques de la République du Niger. Ed. BRGM, N° 48 (1967) 236 p.
- [25] - S. GODY, M. METZ and M. SAUNIER, Principe de mise en sécurité de puits de mine. *Rapport final*, BRGM/RP-57576-FR, (2009) 39 p.
- [26] - M. AUBERTIN, L. L. SIMON and B. BUISSIERE, Un critère général de plasticité et de rupture pour les matériaux à porosité variable. *Rapport technique*, EPM-RT, (2003) 65 p.
- [27] - S. RICHARD And A. MICHEL, Étude de l'effet du sautage adouci sur la fracturation des parois d'une excavation souterraine, R-310 (2002) 65 p.