

**UTILISATION DE LA TÉLÉDÉTECTION ET DU SIG POUR LA
CARTOGRAPHIE DES ZONES MINÉRALISÉES EN OR DANS LA
PROVINCE PANAFRICAINNE DU SUD EST NIGER
(SUD MARADI ET DAMAGARAM-MOUNIO)**

Fati BOUBACAR* et Moussa KONATÉ

*Université Abdou Moumouni, Faculté des Sciences et Techniques,
Département de Géologie, Laboratoire des Eaux Souterraines et des
Géoressources, BP 10662 Niamey, Niger*

(reçu le 05 Octobre 2020 ; accepté le 25 Décembre 2020)

* Correspondance, e-mail : fboubacar444@gmail.com

RÉSUMÉ

Dans le cadre du Projet d'Appui au Ministère des Mines et de l'Energie du Niger, plusieurs campagnes de prospection géochimique ont été menées entre 1998 et 2002 dans la province panafricaine du Sud Maradi et du Damagaram-Mounio (Sud Est Niger). Les travaux récents en prospection minière ont décelé des anomalies géochimiques en or dans cette province panafricaine. Il fallait donc vérifier l'existence de ces anomalies, non pas par les méthodes classiques de prospection, mais par l'utilisation des techniques de télédétection et du SIG. Cette utilisation combinée de la télédétection et du SIG vise à identifier les secteurs susceptibles de renfermer des anomalies en or dans la zone d'étude. L'objectif de cette étude est de déterminer les zones présentant de fortes anomalies en or. De façon spécifique il s'agit de déterminer les relations entre les roches porteuses de minéralisations aurifères et les structures géologiques de la zone d'étude. A cet effet, l'approche méthodologique utilisée est basée sur une analyse des réseaux de fractures combinée aux données géochimiques. Différentes techniques d'extractions manuelles de linéaments ont été appliquées aux données satellitaires (images Landsat 8). Ces techniques incluent le rehaussement sur l'image Landsat 8, ainsi que l'application des filtres directionnels sur divers outils de traitement (composition colorée, analyse en composante principale (ACP), rapports des bandes). La validation des structures linéaires a été faite sur la base des cartes géologiques et topographiques existantes et des observations de terrain. Plusieurs classes directionnelles de fractures ont été cartographiées : N0°-10°, N20°-N30°, N40°-N50°, N60°-N70°, N90°-N100°, N110°-N120° et N140°-N150°. Les résultats de l'analyse géostatistique soulignent que la densité de fracturation se comporte comme une variable régionalisée. Ainsi, les anomalies aurifères du Damagaram-Mounio et du Sud Maradi sont étroitement associées aux zones de cisaillements.

Mots-clés : *Sud Maradi, Damagaram-Mounio, zone de cisaillement, minéralisation aurifère.*

Fati BOUBACAR et Moussa KONATÉ

ABSTRACT**Use of Remote Sensing and GIS for mapping gold mineralized zones in the Pan-African province of South East Niger (South Maradi and Damagaram-Mounio)**

The Support Project to the Ministry of Mines and Energy of Niger carried out several geochemical prospecting campaigns between 1998 and 2002, in the Pan-African provinces of the South Maradi and Damagaram-Mounio (South-East Niger). More recent mineral prospecting work has revealed the presence of geochemical anomalies in this Pan-African province of the southeastern Niger. It therefore appears necessary to verify the existence of these anomalies, not by conventional prospecting methods, but by using remote sensing and GIS techniques. This combined use of these two techniques aims at identifying the sectors of the study area presenting strong gold anomalies. Specifically, the aim of this study is to determine the relationships between the rocks bearing gold mineralization and the geological structures of the study area. To do so, the methodological approach used is based on the analysis of the relationships between the fracture networks and the spatial distribution of the geochemical data. The validation of the linear structures was done by comparing them with the cartographic data and those resulting from our own field observations. Thus, several directional classes of fractures were identified: N0°-10°, N20°-N30°, N40°-N50°, N60°-N70°, N90°-N100°, N110°-N120 and N140°-N150°. The results of the geostatistical analysis show that fracture density behaves as a regionalized variable. The major result of this study shows that the Damagaram-Mounio and South Maradi gold anomalies are closely associated with shear zones.

Keywords : *South Maradi, Damagaram-Mounio, shear zone, gold mineralization.*

I - INTRODUCTION

Le socle du Sud Maradi et du Damagaram-Mounio, qui est une portion de la zone mobile panafricaine située à l'Est du Craton Ouest Africain, représente la partie méridionale de la chaîne Trans-Saharienne, s'étendant du Hoggar au nord, au golfe du Bénin au sud. Cette chaîne Trans-Saharienne résulte de la convergence entre quatre cratons : le Craton Ouest Africain, le Craton de São Francisco, le Craton du Congo et le Métacraton Saharien [1]. Le socle de cette province panafricaine est constitué de formations supracrustales précambriennes, recelant plusieurs indices de minerais. L'analyse des structures linéamentaires est une étape essentielle dans la compréhension de la tectonique régionale et dans la mise en œuvre des programmes de prospection minière. Les fractures sont des structures linéaires ou curvilignes souvent

associées à des éléments géomorphologiques et / ou à des structures tectoniques variées [2]. La télédétection et le SIG demeurent des moyens incontournables dans la mise en évidence des réseaux de fractures et dans la recherche minière. Elles permettent en effet d'établir une représentation cartographique des réseaux de fractures, garantissant l'intégration et la visualisation des données géographiques, ce qui permet d'aboutir à des modélisations. La cartographie des réseaux de fractures permet à terme de déterminer des zones favorables à la mise en place des minéralisations et leur distribution spatiale. Ces fractures représentent des conduits favorables pour la circulation des fluides minéralisateurs en or [3]. En dépit de la présence d'anomalie en or signalé par les travaux de [4], la revue de la littérature a montré que peu de travaux ont été réalisés sur la minéralisation aurifère dans la zone d'étude. Pour pallier ces insuffisances, une approche méthodologique intégrant les techniques de télédétection, l'analyse structurale et l'analyse géostatistique a été mise en œuvre. Les méthodes d'analyse statistique et géostatistique demeurent inévitables dans la recherche des zones favorables aux minéralisations aurifères. A cet effet, un variogramme est utilisé pour orienter l'analyse structurale [5]. La présente étude a pour objectif général de situer les endroits où la minéralisation aurifère est préférentiellement concentrée. Les techniques de télédétection ont été utilisées pour caractériser les réseaux de fractures, tandis que le SIG a permis de cartographier les zones présentant des minéralisations en or. De façon spécifique il s'agit de :

- élaborer la carte des réseaux de fractures des secteurs d'étude ;
- identifier les zones à forte teneur en or,
- déterminer les relations entre les fractures et la distribution des teneurs en or.

II - MATÉRIEL ET MÉTHODES

II-1. Cadre géologique et structural

La zone d'étude est située au Sud-Est du Niger. Elle longe la bande frontalière avec le Nigeria, couvrant les régions de Maradi et de Zinder (*Figure 1*).

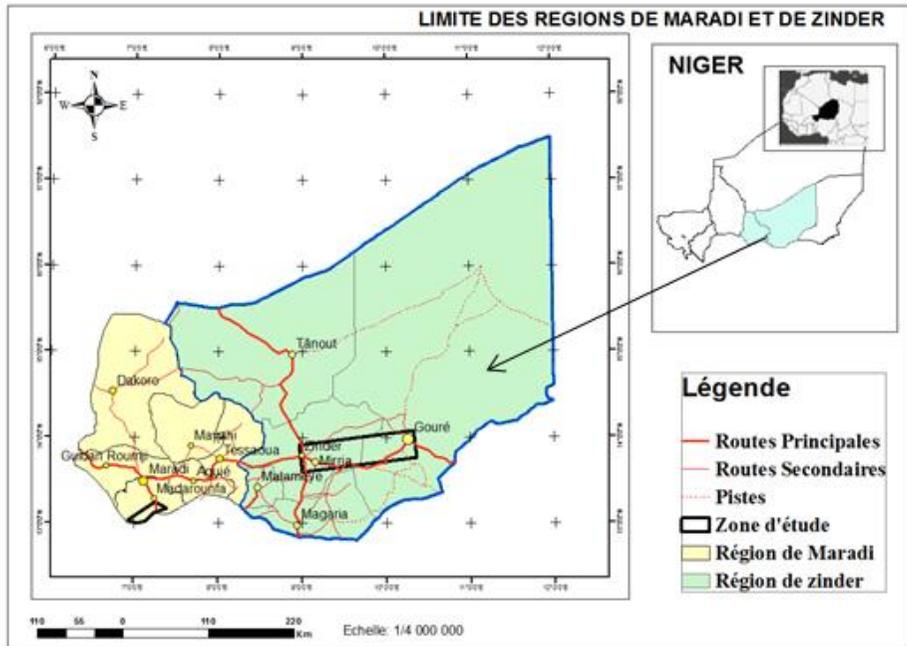


Figure 1 : Limite de la zone d'étude

II-1-1. Massif du Sud Maradi

Des travaux de cartographie aéromagnétique réalisés par [4] concernant le Sud Maradi révèlent que les terrains panafricains sont affectés par plusieurs structures de déformation ductile telles que : les plis, les couloirs de cisaillements ductiles, les divers types de schistosité/foliation (**Figure 2**).

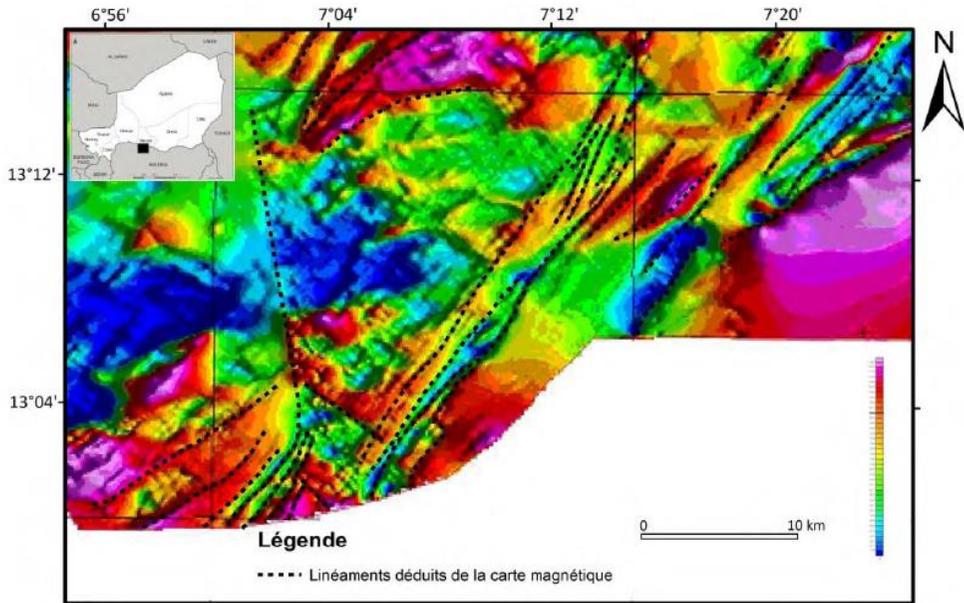


Figure 2 : Carte aéromagnétique au 1/200.000ème, montrant les structures de déformation ductile du socle cristallin et cristallophyllien du Sud Maradi [4]

Du point de vue tectonique, l'évolution structurale de cette portion Nord-Est du Bouclier Bénino-Nigérien est à replacer dans le cadre de l'orogénèse panafricaine qui a concerné, selon [6], la période allant de 750 à 450 Ma. Les structures tectoniques du socle du Sud Maradi découlent de la succession de deux périodes majeures de déformation (D1, D2) :

- la première période D1 de déformation comprend deux épisodes (D1a et D1b). L'épisode D1a de déformation ductile présente une forte composante coaxiale. Pendant l'épisode D1a, les couloirs de déformation NE-SW sont marqués par le développement d'une schistosité/foliation $N50^\circ$ par aplatissement pur, associée à la formation de plis anisopaques [7]. La direction moyenne de raccourcissement varie de $N110^\circ$ à $N140^\circ$.

Le deuxième épisode D1b de déformation semi-ductile, présente une forte composante rotationnelle. Pendant cet épisode, les couloirs de cisaillements NE-SW et NNE-SSW ainsi que les décrochements de même orientation jouent en dextre [7].

- la deuxième période D2 de déformation cassante est représentée par un système de fractures conjuguées formant parfois un réseau de plans de fractures répétitifs NE-SW et NW-SE. Cette deuxième période, à

raccourcissement globalement E-W, est caractérisée par la présence de failles décrochantes d'orientation N110° à N140° qui décalent en senestre toutes les structures antérieures [7].

Les grands ensembles lithostructuraux du Sud Maradi forment des bandes de terrain limités par des zones de cisaillement ductile, d'orientation NE-SW à jeu dextre [4].

II-1-2. Massif du Damagaram-Mounio

La province du Damagaram-Mounio se situe plus à l'Est du domaine panafricain du Sud Maradi (**Figure 3**). Elle a été affectée par l'orogénèse panafricaine vers 600 Ma. Cette province est constituée par des formations cristallines paléoprotérozoïques, intrudées par des granites panafricains, recoupés eux-mêmes par des granites jeunes (complexes annulaires de Gouré et de Zernouski). Ces formations paléoprotérozoïques sont formées de leptynites, de gneiss, de micaschistes et de granites [8].

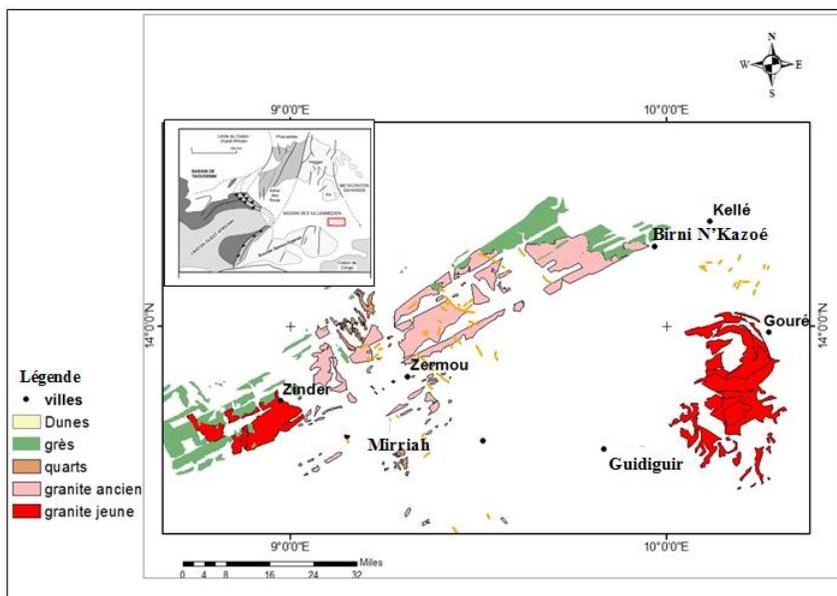


Figure 3 : Carte géologique simplifiée du Damagaram-Mounio [6], modifiée)

Les formations d'âge infracambrien existent également dans l'extrémité Est de la région du Damagaram. Du point de vue structurale cette zone est affectée par des formations géologiques à fort pendage, d'orientation NE-SW, affectées par des cisaillements N20° et N130°, associés au cortège de quartz filonien. Le Damagaram-Mounio est considéré comme une province métallogénique présentant plusieurs indices de minéralisations en or.

II-2. Méthodologie

Divers traitements ont été appliqués : le prétraitement des images satellites, le mosaïquage, la composition colorée, l'analyse en composantes principales (ACP), l'application des filtres directionnels, l'analyse géostatistique de la densité de fracturation, la projection des données géochimiques et l'analyse de leur répartition.

II-2-1. Prétraitement des images satellites

Les images landsat 8 couvrant la zone d'étude ont subi des traitements afin améliorer la qualité des images. Une correction géométrique de l'image a été réalisée à partir de points de calage extraits des cartes topographiques, afin d'éliminer les distorsions géométriques. Cette procédure permet de rendre parfaitement superposables les différentes cartes existantes.

II-2-2. Mosaïquage

Le mosaïquage consiste en un assemblage d'images satellitaires (scènes landsat 8) pour l'extraction de la zone d'étude (**Figure 4**).

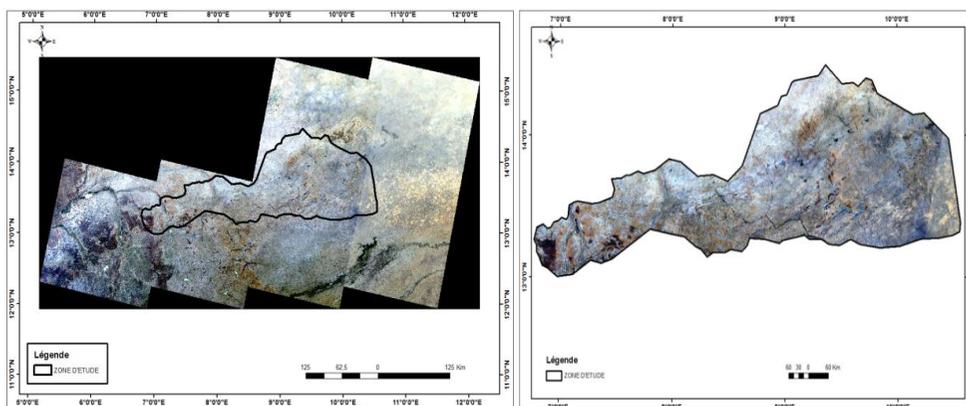


Figure 4 : Mosaïquage et extraction de la zone d'étude (secteurs du Sud Maradi et du Damagaram-Mounio)

II-2-3. Compositions colorées

Des compositions colorées en fausse couleur ont été appliquées aux images satellites. Le traitement a consisté à combiner les bandes 742, 753 et 752. Ce qui a permis de mettre en évidence les principaux linéaments.

II-2-4. Analyse en Composantes Principales

L'analyse en composantes principales (ACP) permet de réduire l'information contenue dans plusieurs bandes en un nombre plus restreint de composantes, en éliminant les informations inutiles. Parfois l'information obtenue dans 5 ou 7 bandes est ramenée en seulement 3 composantes. Cette analyse permet, entre autres, de créer des compositions colorées des trois premières composantes, ce qui favorise une interprétation visuelle, augmentant ainsi le contraste entre les divers objets au sol [9].

II-2-5. Application des filtres directionnels

L'application des filtres directionnels a pour objectif la mise en relief des discontinuités lithologiques et structurales [10]. Les filtres directionnels Sobel de matrice 7×7 d'orientation N-S, NE-SW, E-W, NW- SE utilisés dans cette étude sont ceux de [11]. Ils sont représentés dans le **Tableau 1**. L'application de ces filtres directionnels sobel sur la bande 4 de l'image landsat 8 a permis de détecter un grand nombre de linéaments. L'extraction manuelle à l'écran a permis de recenser tous les linéaments (**Figure 5**).

Tableau 1 : Matrice 77 des filtres directionnels de SOBEL

Filtre SOBEL de direction N-S							Filtre SOBEL de direction E-W						
1	1	1	2	1	1	1	-	-	-	0	1	1	1
1	1	2	3	2	1	1	-	-	-	0	2	1	1
1	2	3	4	3	2	1	-	-	-	0	3	2	1
0	0	0	0	0	0	0	-	-	-	0	4	3	2
-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0	3	2	1
-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0	2	1	1
-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0	1	1	1
Filtre SOBEL de direction NE-SW							Filtre SOBEL de direction NW-SE						
0	1	1	1	1	1	2	2	1	1	1	1	1	0
-	0	2	2	2	3	1	1	3	2	2	2	0	-
-	-	0	3	4	2	1	1	3	2	2	2	0	-
-	-	-	0	3	2	1	1	2	4	3	0	-	-
-	-	-	-	0	2	1	1	2	0	-	-	-	-
-	-	-	-	-	0	1	1	0	-	-	-	-	-
-	-	-	-	-	-	0	0	-	-	-	-	-	-

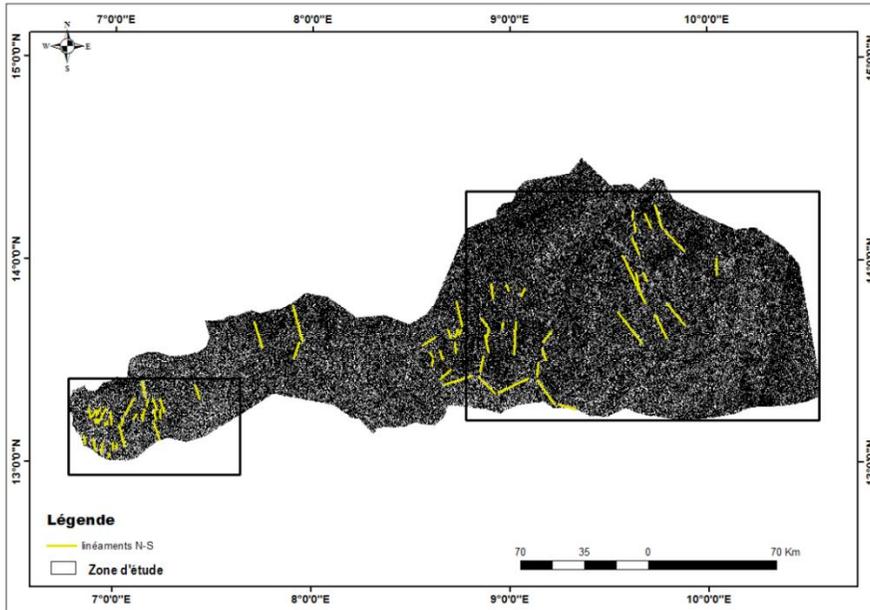


Figure 5 : Filtre de direction E-W rehaussant les accidents de direction N-S

Les données aéromagnétiques auxquelles ont été appliquées un filtre passe-bas ont été utilisées pour extraire les différentes fractures observées en surface (Figure 6), mais aussi celles qui existent à une certaine profondeur, à l'aide du logiciel Arcgis 10.2.2.

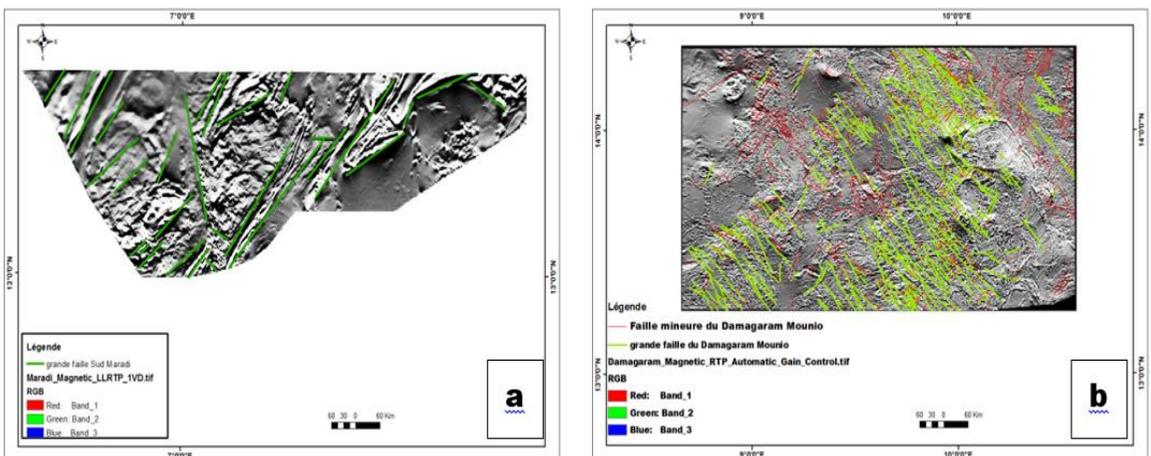


Figure 6 : a) Carte du champ aéromagnétique total du Sud Maradi montrant les principaux linéaments ; b) Carte du champ aéromagnétique total du Damagaram-Mounio montrant les structures linéamentaires

II-2-6. Analyses géostatistiques de la densité de fracturation

L'analyse géostatistique est basée sur la théorie des variables régionalisées. Elle vise à mettre en évidence, la structuration spatiale du phénomène étudié et à envisager son estimation. L'analyse géostatistique intervient donc là où se pose le problème de l'analyse des données spatiales. L'analyse géostatistique de densité de fracturation en longueurs cumulées permet d'étudier la structure spatiale du phénomène étudié à l'aide du variogramme expérimental et de déterminer la corrélation entre les points mesurés en fonction de la distance. Cette analyse géostatistique porte sur la fracturation tous azimuts. La **Figure 7** illustre la représentation graphique du variogramme théorique. La variable étudiée est la densité de fracturation en longueurs cumulées par maille carrée de 10 m x 10 m. Le variogramme est aussi un outil d'analyse structurale. Il permet la caractérisation des structures présentant une variabilité spatiale des grandeurs considérées : teneur, puissance, accumulation, fracture etc. La réalisation du variogramme représente la première étape, indispensable à toute étude géostatistique.

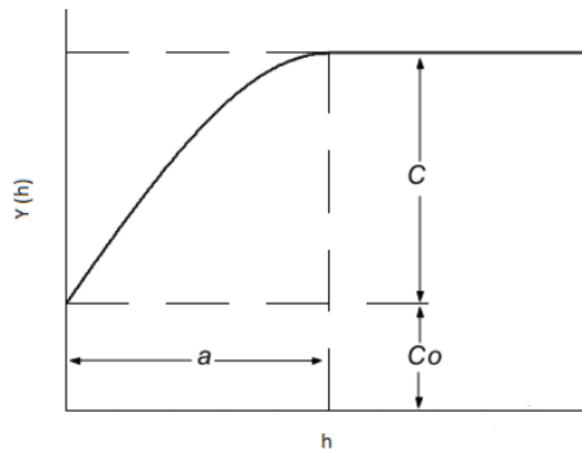


Figure 7 : Principales caractéristiques du variogramme expérimental

II-2-7. Projection des données géochimiques et analyse de leur répartition

La méthode consiste à réaliser une carte de teneur en or en projetant les données géochimiques obtenues. Une technique d'analyse géostatistique (krigeage ordinaire) est utilisée pour estimer (interpoler) spatialement les teneurs en or.

III - RÉSULTATS ET DISCUSSION

III-1. Cartographie des linéaments

Les traitements numériques de l'image satellitaire Landsat 8 et de l'image aéromagnétique, permettent de caractériser les réseaux linéamentaires des régions du Sud Maradi et du Damagaram-Mounio (*Figure 8*). Il s'agit d'extraire manuellement les linéaments de l'image Landsat 8 et ceux de l'image aéromagnétique, pour élaborer une carte de réseaux linéamentaires. Les outils d'extraction utilisés sont : l'analyse en composante principale (ACP) et les compositions colorées et filtrées. La carte du réseau de fractures est obtenue après la validation de la carte des réseaux de linéaments.

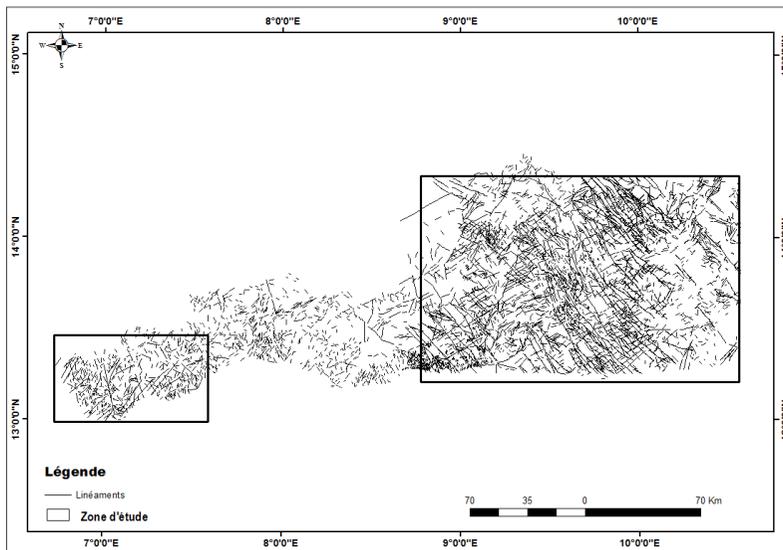


Figure 8 : Carte des linéaments déduits des images Landsat 8 et aéromagnétiques

III-2. Contrôle et validation du réseaux de fractures

La phase de contrôle et de validation des accidents géologiques extraits des traitements manuel et numérique des images Landsat 8 a été indispensable pour estimer la pertinence de la méthode utilisée et des résultats obtenus. Les données issues des cartes géologiques sont comparées aux structures linéamentaires extraites des images satellitaires afin de leur donner une signification structurale [12 - 14]. Nous avons été amenés à confronter la carte des linéaments avec la carte topographique. Il apparaît ainsi que tous les linéaments superflus, d'origines anthropiques (telles que les routes, les pistes, les limites de forêts, les surfaces de culture et les lignes de haute tension etc)

ont été retirés [14 - 17]. De la même façon, les cours d'eau qui ont été considérés comme étant des linéaments ont également été soustraits. L'approche de validation a consisté à la vérification des structures sur le terrain. La carte linéamentaire (**Figure 8**) obtenue à partir de la compilation des données satellitaires (images Landsat 8), de la cartographie numérique (SIG) a été confrontée aux observations de terrain. Les linéaments qui coïncident avec les directions d'accidents mesurées sur le terrain sont considérés comme étant des fractures. Cette méthode nous a permis de dresser la carte des réseaux de fractures de la zone d'étude. La carte validée des réseaux de fractures montre que la zone d'étude est très fracturée (**Figure 9**).

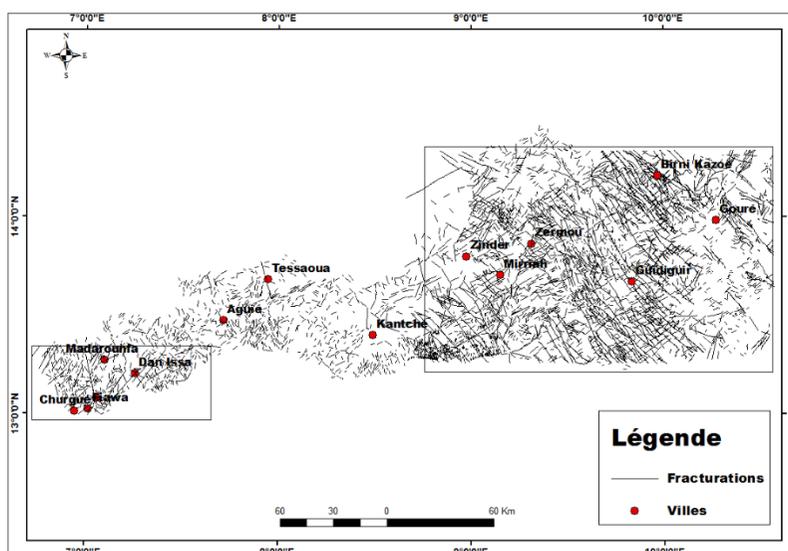


Figure 9 : Carte validée des réseaux de fractures, réalisée à partir des images Landsat 8 et des images aéromagnétiques

III-3. Analyse des structures de déformation

Plusieurs types de structures géologiques caractérisent la zone d'étude. Il s'agit : des divers types de schistosités (de fracture, de flux et la foliation), des couloirs de cisaillements ductiles et des plis. Trois générations de schistosités ont été identifiées (S1, S2, et S3) dans le Sud Maradi, et dans le Damagaram-Mounio. Dans le Sud Maradi, la schistosité/foliation S1 a une orientation moyenne N30° à N50° (**Figure 10A**). Elle présente localement une géométrie sigmoïde dextre liée au fonctionnement des couloirs de cisaillement d'orientation moyenne N40°. Cette schistosité/foliation S1 est localement replissée et donne des plis, dont les plans axiaux ont une direction moyenne N10° (**Figure 10D**). Dans le Damagaram-Mounio par contre, la schistosité/foliation S1 a une orientation moyenne N140° à 160° (**Figure 10E**).

En revanche, la deuxième génération de schistosité S2 correspond à une schistosité de fracture. Elle présente une orientation presque identique : $N90^\circ$ à $N120^\circ$ (dans le Sud Maradi) et $N80^\circ$ - $N105^\circ$ (dans le Damagaram-Mounio). Dans les deux secteurs, cette schistosité S2 recoupe la S1 (*Figure 10C et 10E*). La troisième génération de schistosité S3, qui est également de fracture, a une orientation moyenne $N40^\circ$ aussi bien dans le Sud Maradi que dans le Damagaram Mounio. Cette schistosité S3 recoupe la schistosité S2 (*Figure 10F*).

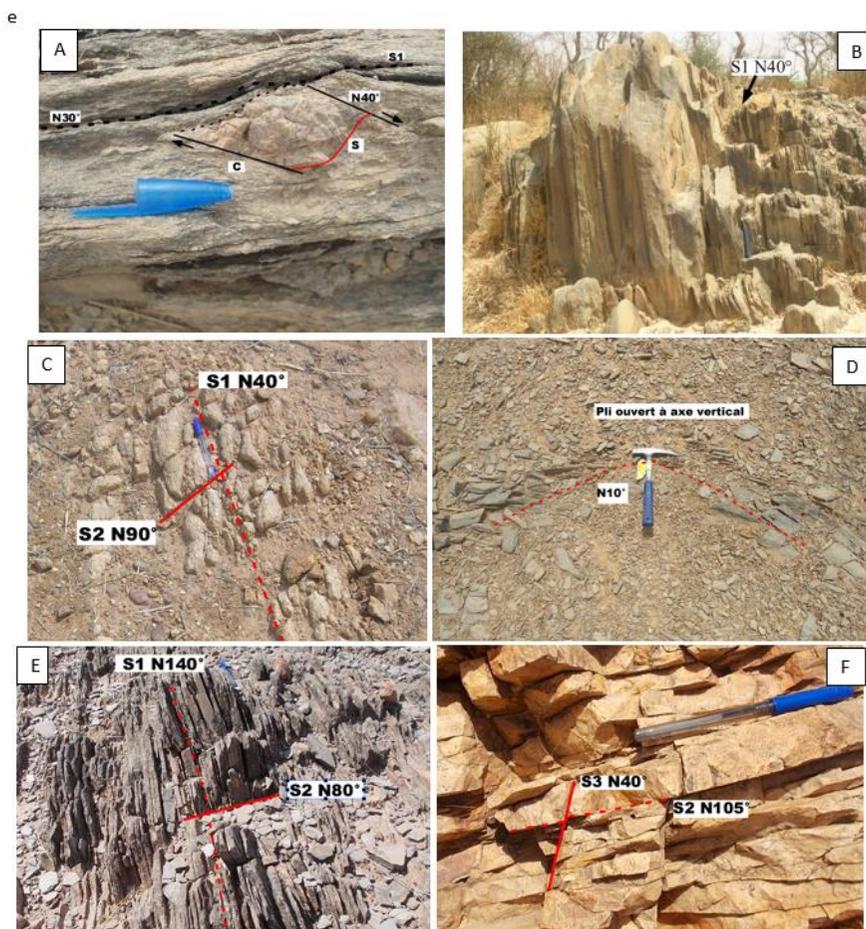


Figure 10 : Différents types de structures de déformation observées dans les terrains panafricains du Sud Maradi et du Damagaram-Mounio : A : Gneiss œillé à porphyroblastes de feldspaths potassiques présentant une géométrie sigmoïde dextre ; B : Schistosité S1 de direction $N40^\circ$ dans les métasédiments ; C : Schistosité S2 de fracture, d'orientation $N90^\circ$, recoupant la S1 d'orientation $N40^\circ$; D : Pli ouvert à axe vertical ; E : Schistosité S2 de fracture, d'orientation $N80^\circ$, recoupant la S1 d'orientation $N140^\circ$; F : Schistosité de fracture S3, d'orientation $N40^\circ$, recoupant la schistosité S2 $N105^\circ$

III-4. Analyse statistique des réseaux de fractures

L'analyse statistique du réseau de fractures a porté sur deux catégories de données :

- le nombre de fractures recensées suivant une direction donnée ;
- la longueur cumulée des fractures dans une direction donnée.

Les différentes directions de structures de déformation mesurées sur le terrain sont identiques aux directions représentées sur la rosace directionnelle et l'histogramme (*Figure 11*), qui a été établie à partir des images satellites. La carte du réseau de fractures (*Figure 9*) obtenue après les divers traitements met en évidence 1772 fractures de longueurs variables. Il apparaît ainsi que la distribution des fractures en nombre et en longueurs cumulées n'est pas homogène (*Figure 11*). La rosace directionnelle portant sur le nombre de fractures (*Figure 12a*) montre les différentes directions majeures recensées suivantes : N0°-10° (11 %), N90°-N100°, N140°-N150°, N150°-160° (8 %), N20°-N30°, N60°-N70° (7 %), N40°-N50°, N110°-N120°, N130°-140° (6 %). L'analyse statistique en pourcentage de longueur cumulée de fractures (*Figure 12b*) met en évidence la prédominance des classes directionnelles suivantes : N50°-N60°, N120°-130° (8 %) N40°-N50°, N140°-N150° (7 %), N20°-N40°, N90°-N100°, N130°-140° (6 %). Ces directions peuvent être regroupées en quatre grandes catégories de fractures :

- Les fractures de direction N0°-N10° représente 11 % en nombre de fractures et 6 % en pourcentage de longueur cumulée de fractures. Elle coïncide avec la direction des plans axiaux des plis. Les grands accidents de direction N0° à N10° ont été générés selon [7] par le premier épisode de déformation panafricaine D1a. A l'échelle régionale, la direction la plus importante est celle de la zone de cisaillement de *Raghane* large de 5 à 10 km traversant l'Air et une partie du Hoggar sur plus de 400 km [18].
- Les directions de fractures N20°-N30° et N50°-N70° représentent 7 % en nombre de fractures. Elles correspondent à des fractures prédominantes en longueur cumulée avec un pourcentage de 8%. ces directions seraient liées, dans leur grande majorité, au deuxième épisode D1b de déformation panafricaine [7]. Elles correspondent également à des directions de schistosités de fractures dans le Damagaram-Mounio.
- La famille de fractures N90°-N100° et N150°-160° serait également tardive à post-panafricaine [7]. Elle représente 8 % en nombre de fractures et 7 % en pourcentage de longueur cumulée de fractures. La direction N90°-100° est celle de la schistosité de fracture S2 dans le Sud Maradi et dans le Damagaram-Mounio alors la direction N140°-160° est celle de la schistosité/foliation S1 du Damagaram-Mounio.

Les fractures de directions N110°-N120°, N130°-150° et N160°-N170° correspondent à 6 % en nombre de fractures et à 7 % en pourcentage de longueur cumulée de fractures. Ces directions ont été observées principalement au Nord du Niger, dans le massif de l’Aïr, sur le socle panafricain [19]. Il est à noter également que les grands couloirs de cisaillement du Damagaram Mounio ont une orientation N130°-N140°. Des études menées par [20 - 22] ont mis en évidence dans le socle panafricain du Nigeria plusieurs directions de fractures : NW-SE, NE-SW, NNE-SSE, N-S, et E-W.

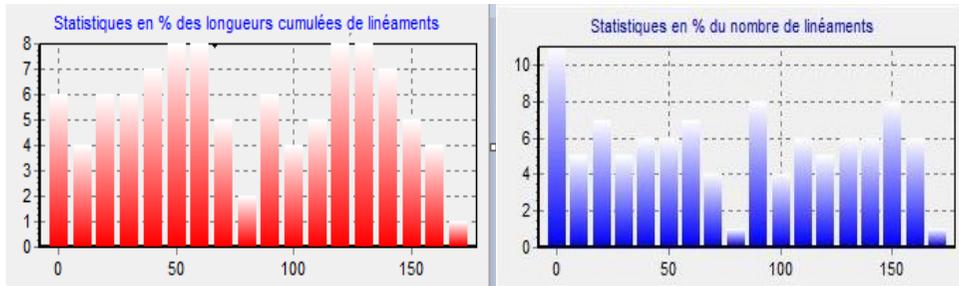


Figure 11 : Histogrammes indiquant les résultats statistiques en % du nombre de fractures et des longueurs cumulées des fractures

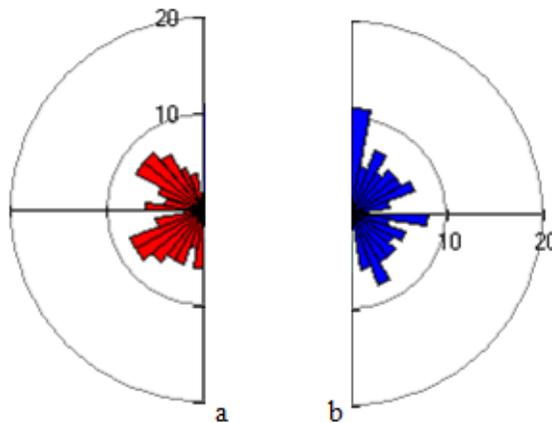


Figure 12 : Rosace directionnelle des fractures; a : en nombre des fractures; b : en longueur cumulée

III-5. Analyse géostatistique des fractures

Le variogramme de la fracturation (densité de fracturation en longueurs cumulées), tous azimuts, a été calé au modèle exponentiel. Sur le variogramme de la **Figure 13** on note les caractéristiques suivantes : la présence d’un saut abrupt à partir de $0,0323 \cdot 10^{-2}$ appelé effet de pépite, qui est un phénomène

couramment rencontré dans l'analyse géostatistique des milieux fracturés [23]. Il est dû à l'action combinée des hétérogénéités spatiales à plus petite échelle et aux incertitudes de mesure. Il est difficile sur un variogramme expérimental de séparer l'effet de pépite de l'erreur de mesure [24, 25]. La **Figure 13** montre également l'existence d'un palier ($C = C_0 + C_1$), jusqu'à une distance de $1,250 \cdot 10^{-2}$ m, valeur autour de laquelle se stabilise le variogramme. La présence du palier permet de déduire que la variable régionalisée est une fonction aléatoire stationnaire. L'hypothèse de stationnarité admise est vérifiée et l'usage de la théorie des fonctions intrinsèques est justifié [26, 27]. Le variogramme présente aussi une portée qui correspond à la valeur à partir de laquelle le palier ou le plateau est atteint. Cette distance est exprimée par la valeur : $a = 0,625 \cdot 10^{-2}$ m. Le variogramme ainsi obtenu permet d'interpréter les paramètres de régionalisation (l'effet de pépite, le palier et la portée). Ces différentes caractéristiques montrent que la fracturation de la zone d'étude n'est pas répartie de façon aléatoire. Le variogramme de la fracturation tous azimuts est donc spatialement bien structuré. La densité de fractures en longueurs cumulées s'apparente à une variable régionalisée.

Tableau 2 : Paramètres de régionalisation de la fracturation tous azimuts ajustés au modèle exponentiel de la zone d'étude

Modèle d'ajustement	Portée (a) (m)	Palier (C) (m)	Plateau-pépite (C-Co) (m)	Effet de pépite (Co) (m)
Sphérique	$0,625 \cdot 10^{-2}$	$1,250 \cdot 10^{-2}$	$1,217 \cdot 10^{-2}$	$0,0323 \cdot 10^{-2}$

Les paramètres de régionalisation de la fracturation tous azimuts (**Tableau 2**) permettent d'établir l'**Équation** suivante :

$$\gamma(h) = 1,217 \cdot 10^{-2} (1 - \text{Exp}(-h / 0,625 \cdot 10^{-2})) + 0,0323 \cdot 10^{-2} \quad (1)$$

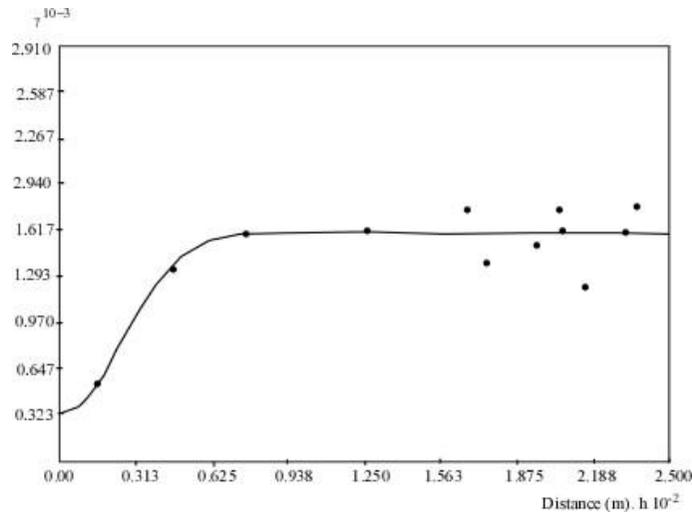


Figure 13 : Variogramme de la fracturation tous azimuts, ajusté au modèle exponentiel

III-6. Carte des anomalies géochimiques

Les sédiments alluvionnaires ou "*stream sediments*" prélevés dans les oueds (ou koris) de la zone d'étude (Sud Maradi et Damagaram-Mounio) ont fait l'objet d'analyses géochimiques pendant la campagne de prospection géologique et minière du Ministère des Mines en 2004. Les données géochimiques recueillies ont été projetées sur des fonds de cartes géologiques de la zone d'étude, pour visualiser les zones à fortes teneurs. (**Figure 14**). L'analyse des données obtenues par la méthode de krigeage donne une répartition des teneurs en or dans la zone d'étude. La minéralisation est répartie en différentes zones (**Figures 14a et 14b**). Dans le Damagaram Mounio la zone à fortes teneurs en or se localise au Nord-Est de la ville de Zinder (Ouest de Birni Kazoé et Nord-Ouest de Zermou) avec des teneurs allant de 3,04 à 14,70 ppb. Par contre dans la zone du Sud Maradi les teneurs varient de 86,90 à 745 ppb (**Figure 14b**). Les plus fortes teneurs en or sont localisées au Sud-Est de Maraka et à l'Ouest de Fiawa (**Figure 14b**).

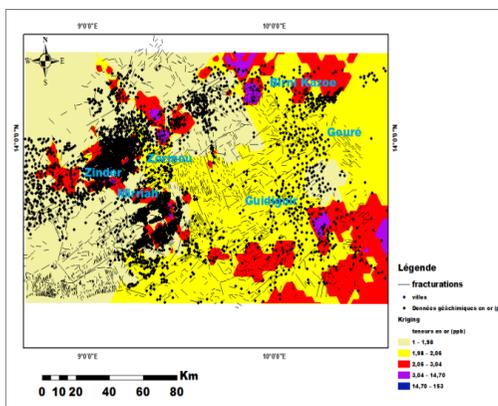


Figure 14a : Carte des teneurs en or dans le secteur du Damagaram-Mounio

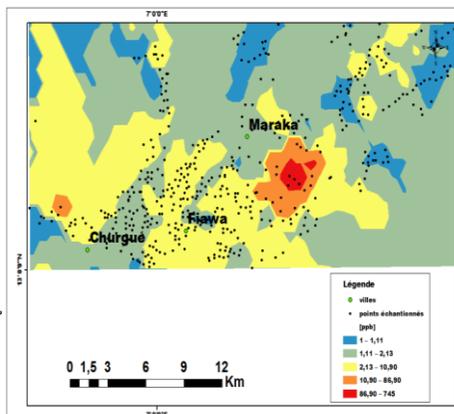


Figure 14b : Carte des teneurs en or dans le secteur du Sud Maradi

III-7. Relations entre les formations géologiques et les anomalies en or

La carte des teneurs en or a été superposée sur la carte géologique du secteur du Sud Maradi et du Damagaram-Mounio afin d'identifier les relations entre les anomalies en or avec les structures et les formations géologiques. Dans le secteur du Damagaram-Mounio (**Figure 15a**) les plus fortes teneurs en or se trouvent au voisinage du socle granitique panafricain (granite de Zermou), intrudé par des filons de quartz, et aussi dans les grès-quartzitiques de Birni Kazoé et de Mirriah. Ce type de contexte a été décrit dans le Liptako nigérien [28, 29] où la minéralisation aurifère est généralement associée à des filons de quartz (roches acides), tandis qu'au Burkina Faso la minéralisation aurifère se rencontre surtout dans les roches volcaniques et volcano-sédimentaires [30].

- Dans le secteur du Sud Maradi (**Figure 15b**) les teneurs les plus élevées en or ont été identifiées dans les gneiss et les schistes mylonitiques ayant subi au moins une phase d'altération hydrothermale (origine primaire de l'or) et également dans les placers alluvionnaires (origine secondaire de l'or). [31]. Des occurrences similaires d'or ont été décrites dans le Hoggar, au Sud de l'Algérie, où l'or se trouve dans les veines quartzieuses et dans les mylonites et les ultramylonites.

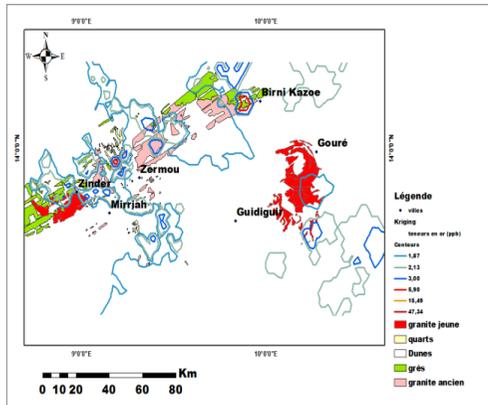


Figure 15a : Carte représentant les projections des données géochimiques (isovaleurs) sur la carte géologique du secteur du Damagaram-Mounio

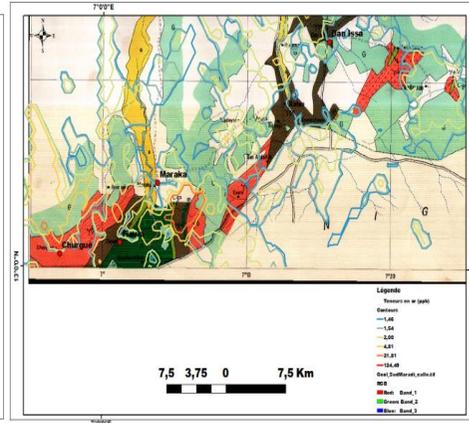


Figure 15b : Carte représentant les projections des données géochimiques (isovaleurs) sur la carte géologique du secteur du Sud Maradi : $Y\delta$: granodiorite; gn: granitogneiss ; L-gn: leptynite et gneiss rubané ; m : schiste épi-métamorphique ; G : grès argileux du Crétacé et du Continental Terminal ; quartzite et grès ; μa : alluvions argileux

III-8. Relations entre les indices d'or et les fractures

La carte de répartition des teneurs en or (**Figure 16**) montre que les fortes teneurs sont situées à proximité des zones de cisaillement du socle ("Shear Zone"). Il faut noter également que ce type de contexte se rencontre au Sénégal où la minéralisation aurifère se trouve dans les zones de cisaillement d'orientation moyenne N20° de Kédougou Kéniéba Inlier [32, 33] associée aux veines de quartz. Dans les différents couloirs de cisaillement, la répartition des teneurs en or n'est pas aléatoire. Cependant les directions structurales majeures NE-SW et NW-SE constituent les horizons porteurs des plus fortes teneurs en or. Les zones d'enrichissement de l'or se situent au niveau des zones de faiblesses (zones de fractures empruntées par les cours d'eau), qui sont des zones où l'or peut subir des processus de migration et de remobilisation. Ces dernières pourraient conduire à des zones de concentration en or. Les différents stades de percolations des fluides et de dépôt de la minéralisation sont accompagnés d'une altération hydrothermale, qui consiste à une silicification, affectant les fractures et les couloirs de cisaillement [34]. Les couloirs de cisaillement représentent le moteur dynamique de la mise en place des fortes teneurs en minéralisations aurifères. Cette observation a été réalisée dans la

zone de cisaillement d'Anka (au Nord du Nigéria) où la minéralisation en or est associée à un important couloir de cisaillement qui se prolonge jusqu'au Sud Maradi [35, 36]. Des observations similaires ont été réalisées également au Nord-Ouest du Nigéria, dans le secteur de Maru-Anka, où la zone d'altération longeant les zones de cisaillement présentant de fortes concentrations en or [37]. Ces zones de cisaillement représenteraient des conduits favorables au mouvement de fluides minéralisateurs [22]. Les travaux menés par [4] sur les anomalies aurifères de la zone d'étude montrent également que des indices d'or se rencontrent dans les alluvions, au voisinage des couloirs de cisaillements majeurs.

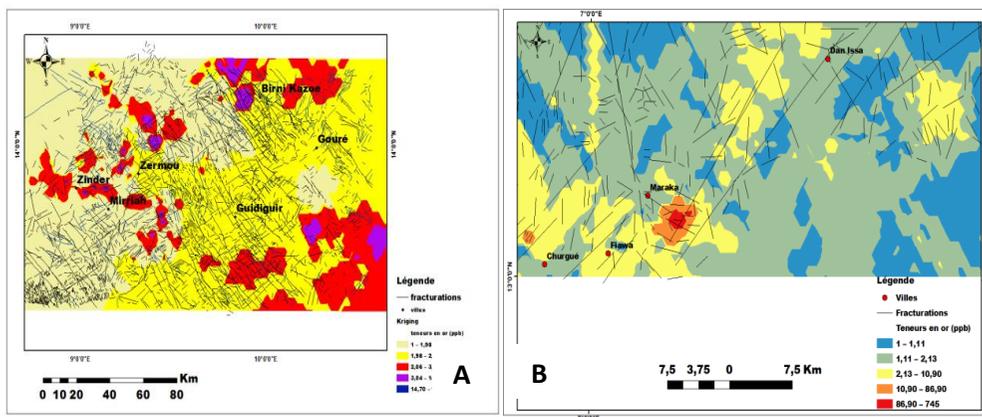


Figure 16 : Carte des réseaux de fractures et des teneurs en or. A : Seteur du Damagaram-Mounio ; B : Secteur du Sud Maradi

IV - CONCLUSION

L'analyse géostatistique montre que le variogramme de fracturations tous azimuts, spatialement bien structuré, est caractérisé par un palier, une portée et un effet de pépite. La densité de fracturation en longueur cumulée s'identifie à une variable régionalisée. La confrontation des cartes de linéaments avec les données géologiques de surface a montré que les structures linéamentaires des images satellitaires et des données de géophysique aéroporté ont pu être identifiées et reconnues sur le terrain, comme étant des fractures. La plupart des oueds coïncident avec le tracé des fractures. Ces dernières jouent le rôle de drain des eaux météoriques, assurant la minéralisation secondaire de l'or dans les placers alluvionnaires. L'étude structurale a permis de déterminer les deux directions structurales majeures porteuses de minéralisation en or, qui-sont : NE-SW et NW-SE. La minéralisation de la zone d'étude est spatialement liée au gneiss, aux schistes mylonitiques, au socle granitique panafricain (granite de Zermou intrudé par des filons de quartz), au grès quartzitique de Birni Kazoé et de Mirriah et aux zones fortement cisailées. Cette étude montre ainsi que la télédétection et le SIG sont des techniques de pointe pouvant être utilisées pour la prospection minière.

RÉFÉRENCES

- [1] - M. G. ABDEL SALAM, J. P. LIÉGEOIS and R. J. STERN, "The Saharan Metacraton", *Journal of African Earth Sciences*, Vol. 34, N°3-4 (2002) 119 - 136
- [2] - K. L. IDI, *Afrique SCIENCE*, 15 (5) (2019) 39 - 53, <http://www.afriquescience.net>
- [3] - A. JOSEPH, Recharges et paléo recharges des nappes en région sub désertiques au Niger. Thèse de l'université Paris VI, (1990) 163 p.
- [4] - PRDSM, Projet de géophysique aéroportée dans le secteur Sud Maradi. Ministère des Mines et de développement Industriel, (2013) 55 p.
- [5] - A. KOUDOU, V. T. ASSOMA, B. ADIAFFI, TA. M. YOUAN, K. F. KOUAME & T. LASM, *Larhyss Journal*, N°20 (2014) 147 - 166 p.
- [6] - A. C. AJIBADE and J. B. WRIGHT, The Togo-Benin-Nigeria Shield: evidence of crustal aggregation in the Pan-African belt. *Tectonophysics*, 165 (1989) 125 - 129
- [7] - S. I. BARAOU, Contribution à l'étude pétrographique, géochronologique et structurale des formations panafricaines du Sud Maradi (Sud Niger): relations avec les indices aurifères, Thèse de doctorat unique de l'Université Abdou Moumouni, (2018) 99
- [8] - R. MIGNON, Carte géologique de Damagaram-Mounio et Sud Maradi, bureau de recherches géologiques et minières, paris, (1970) 16 - 57
- [9] - H. RANJBAR, M. HONARMAND, Z. MOEZIFAR, "Analysis of ETM+ and Airborne Geophysical Data for Exploration of Porphyry Type Deposits in the Central Iranian Volcanic Belt, Using Fuzzy Classification. *Remote Sensing for Environmental Monitoring, GIS applications, and Geology III*"W, SPIE, (2004) 165 - 173 p.
- [10] - S. SAWADOGO, Les plutons granitiques de la ceinture de Djibo au nord du Burkina Faso (Afrique de l'ouest) : mécanismes de mise en place et implications dans l'évolution géodynamique de la ceinture. Thèse de Doc de l'Université Ouaga, (2017)
- [11] - H. YESOU, J.C. PION, Y. BESNUS, R. SAINT JEAN, Amélioration des données SPOT pour la cartographie structurale en milieu tropical. Exemple de la région des chapeaux de fer de Pagala Togo. III èmes Journées Scientifiques du Réseau Télédétection UREF, Toulouse, 13-16 (novembre 1990) 143 - 164 p.
- [12] - K. F. KOUAME, "Hydrogéologie des aquifères discontinus de la région semi-montagneuse de Man-Danané Ouest de la Côte d'Ivoire). Apport des données des images satellitales et des méthodes statistique et fractale à l'élaboration d'un système d'information hydrogéologique à référence spatiale," *Thèse de 3ème cycle, Université de Cocody-Abidjan, Côte d'Ivoire*, (1999) 194 p.
- [13] - K. F. KOUAME, P. GIOAN, J. BIEMI and K. AFFIAN, *Revue Télédétection*, Vol. 8, N° 2 (1999) 139 - 156 p.
- [14] - K. F. KOUAME, M. J. PENVEN, B. H. KOUADIO, M. H. SALEY & C. C. GRONAYES, Contribution des images d'aster de terra et D'un modèle numérique d'altitude à la cartographie morphostructurale du

- massif des Toura (Ouest de la Côte d'Ivoire). *Téledétection*, Vol. 6, N°2 (2006) 103 - 121 p.
- [15] - J. P. FAILLAT, "Aquifères fissurés en zone tropicale humide : structure, hydrodynamique et hydrochimie (Afrique de l'Ouest)," *Thèse de doctorat ès Sciences Naturelles, Université du Languedoc-Montpellier II, France*, (1986)534 p.
- [16] - T. LASM and M. RAZACK, *Compte Rendu Académie des Sciences Paris, Science de la Terre et des planètes*, Vol. 33, (2001) 225 - 232 p.
- [17] - T. LASM, K. F. KOUAME, N. SORO, J. P. JOURDA and J. BIEMI, "Analyse géostatistique de la fracturation extraite de l'imagerie spatiale aéroportée et satellitaire. Application à la région de Man-Danané"
- [18] - J. P. LIÉGEOIS, BLACK, Z J. NAVE & LATOUCHEL. *Early and late Pan-African orogenies in the Air assemblage of terranes (Tuareg shield, Niger). Precambrian Research*, 67 (1994) 59 - 88 p.
- [19] - A. ILLIAS, *European Scientific Journal*, Vol. 14, N°9 ISSN: 1857 - 7881 (2018) 19 p.
- [20] - E. C. FERRÉ and R. CABY, Granulite facies metamorphism and charnockite plutonism: examples from the Neoproterozoic Belt of northern Nigeria. *Proceedings of the Geologists Association, US*, (2007) 47 - 54
- [21] - N. G. GOKI, A. N. AMADI, P. I. OLASEHINDE, S. S. DADA, E. A. IKPOKONTE & J. I. D. ADEKEYE, *Journal of Engineering and Technology Research*, Vol. 3 (2) (2011) 26 - 36 p.
- [22] - Y. I. ABUBAKAR, *International Journal of Applied Science and Technology*. Vol. 2, N° 5 (May 2012) 164 - 173 p.
- [23] - J. P. R. JOURDA, Méthodologie d'application des techniques de télédétection et des systèmes d'information géographique à l'étude des aquifères fissurés d'Afrique de l'ouest. Concept de l'hydrotechnique spatiale : cas des zones tests de la Côte d'Ivoire. Thèse de Doctorat d'état, ès Sciences Naturelles Université de Cocody, (2005) 429 p.
- [24] - H. MASSOUD, Modélisation de la petite fracturation par les techniques de la géostatistique, Doc. B.R.G.M, N°155 (1988) 197 p.
- [25] - T. LASM, Hydrogéologie des réservoirs fracturés de socle : Analyses statistiques et géostatistiques de la fracturation et des propriétés hydrauliques. Application à la région des montagnes de Côte d'Ivoire. Thèse Doct., Univ. De Poitiers, France, (2000) 274
- [26] - G. ODOUX C., Variabilité spatiale des propriétés hydriques du sol, méthodes et résultats ; cas d'une seule variable : revue bibliographique, *Agronomie*, Vol. 7, 01 (1987) 61 - 71
- [27] - M. RAZACK, A propos de la loi de distribution des fractures: intérêt pour l'hydrogéologie des aquifères de fissures, *C.R.Acad. Sc. Paris, Sér. II*, t., 294 (1982) 1295 - 1297
- [28] - A. SOUMAILA and M KONATÉ, *Africa Geoscience Review*, Vol. 12, N° 3 (2005) 161 - 178 p.
- [29] - Rapport AMI Africa Exploration LTD, Report on drilling Tialkam - Deba permits Sirba belt, Liptako, Niger part 2 : Deba permit, (2010) 33 p.
- [30] - S. SAWADOGO, S. NABA, H. ILBOUDO, A. S. TRAORÉ, S. NAKOLENDOUSSÉ, M. LOMPO, The Belahourou granite pluton (Djibo greenstone belt, Burkina Faso): emplacement mechanism and

- implication for gold mineralization along a shear zone, *Journal of African Earth Sciences*, (2018), doi: 10.1016/j.jafrearsci.2018.04.009
- [31] - A. DJAMAL, B. MOKHTAR and B. ABDELHAK, Control on gold Mineralization at In ouzel Mole, Western Hoggar, South Algeria. Recueil des résumés et Programme PICG638- Abstract volume and Programme PICG638- Dakar, Dec. 5- 19th, (2016) 18 - 19 p.
- [32] - D. DABO, Tectonique et minéralisations aurifères dans les formations birimiennes de Frandi-Boboti, boutonnière de Kédougou-Kéniéba, Sénégal. Thèse de Doctorat, Université de Rennes 1, (2014) 207 p.
- [33] - A. N. R. NDOYE, M. GUEYE, P. M. NGOM and M. DIENE, Structural study of goldbearing shear system at the Kédougou-Kéniéba Inlier, SE Senegal : Evidence of strain partitioning during the Eburnean orogeny. Recueil des résumés et Programme PICG638- Abstract volume and Programme PICG638- Dakar, Dec. 5- 19th, (2016) 70 p.
- [34] - A. BARAKAT, C. MARIGNAC, M.-C. BOIRON, M. CATHELINÉAU, M. BOUABDELLI, Fluid circulation in the Aubearing Ourika gneiss, Atlas of Marrakech, Morocco, *J. Afr. Earth Sci.*, 30 (2000)
- [35] - I. GARBA, "Geochemical characteristics of the gold mineralization near Tsohon Birnin Gwari, northwestern Nigeria", *Chemie der Erde*, Vol. 62, N° 2 (2002) 160 - 170
- [36] - I. GARBA, "Origin of Pan-African mesothermal gold mineralisation at Bin Yauri, Nigeria", *Journal of African Earth Sciences*, Vol. 31, N° 2 (2000) 433 - 449
- [37] - M. R. TALAAT and F. A. F. MOHAMMED, Characterization of gold mineralization in Garin Hawal area, Kebbi State, NW Nigeria, using remote sensing. *The Egyptian Journal of Remote Sensing and Space Sciences*, 13 (2010) 153 - 163