

République Algérienne Démocratique et Populaire

Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique.

**Université Mouloud Mammeri de Tizi-Ouzou Faculté des Sciences Biologiques et des
Sciences Agronomiques.**

Département des Sciences Géologiques



**Mémoire de fin d'études en vue de l'obtention du diplôme de MASTER
en GEOLOGIE**

Option : Ressources Minérales, Géomatériaux et Environnement

**Réalisé Par :
AKKOUL Lydia
HADEF Romaïssa**

Thème :

**Modélisation géologique par la méthode des poids de l'évidence pour
la cartographie du potentiel aurifère et des métaux rares de la région
de Tahifet, Hoggar central, Algérie.**

Soutenu publiquement le 22/06/2025 devant le Jury composé de :

M.HADJ ARAB Larbi	MCB à l'UMMTO	Président
M.HAMIS Ahmed	MCA à l'UMMTO	Examineur
M.ZEGHOUANE Hocine	MCB à l'UMMTO	Encadreur

Année universitaire : 2024/2025



Remerciement



Avant tout, nos gracieux remerciements s'adressent à **Dieu**, notre Créateur, le Tout-Puissant et Miséricordieux, pour nous avoir donné la force, la patience et la volonté nécessaires pour mener à bien ce travail et franchir toutes les étapes de ce parcours académique.

On tient à exprimer notre profonde gratitude à **Monsieur ZEGHOUANE Hocine**, notre promoteur, pour nous avoir proposé ce thème de mémoire riche et pertinent. Malgré ses nombreuses responsabilités, il a su nous accorder une bonne partie de son temps, nous guider avec patience et nous prodiguer des conseils précieux tout au long de l'élaboration de ce travail. Son accompagnement, sa rigueur scientifique et sa bienveillance ont grandement contribué à la réussite de ce mémoire.

Nos remerciements les plus sincères vont également à **Monsieur HAMIS Ahmed**, pour avoir accepté d'examiner ce travail. Ses remarques constructives et son regard critique ont permis d'enrichir la qualité du contenu et d'en affiner l'analyse.

On remercie **Monsieur HADJ ARAB Larbi**, président du jury, pour l'honneur qu'il nous a fait en présidant la soutenance de ce mémoire. Sa présence et son expertise ont apporté un cadre à la fois exigeant et bienveillant à cet événement marquant de notre parcours académique.

On souhaite également exprimer notre gratitude à **l'ensemble des enseignants du département des sciences géologiques de l'UMMTO**, pour leur dévouement et la richesse des enseignements transmis durant ces années d'études.

Dédicace

À mon père bien-aimé,

Il n'existe pas de mots assez forts pour exprimer ce que tu représentes pour moi. Tu es et tu resteras l'homme de ma vie, celui qui a toujours cru en moi, même lorsque moi je doutais.

Depuis ma plus tendre enfance, tu m'as entourée d'un amour immense et d'une protection rassurante. Tu m'as appris à rester digne, humble, travailleuse et honnête, quelles que soient les circonstances. Ce sont ces valeurs que tu m'as transmises qui ont façonné mon caractère et m'ont guidée jusqu'à l'accomplissement de ce mémoire.

Tu as toujours été à mes côtés, dans le silence comme dans les épreuves, dans la tendresse comme dans l'exigence. Tu m'as appris à me relever, à ne jamais baisser les bras, et surtout à croire que chaque effort finit par porter ses fruits. C'est grâce à ton exemple, à ta force et à ton amour que j'ai pu arriver jusqu'ici.

Aujourd'hui, je te dédie ce travail avec tout mon cœur. Même si ton absence laisse un vide que rien ne pourra combler, ton souvenir m'accompagne à chaque instant.

J'espère que, de là où tu es, tu vois mon parcours avec fierté. Que cette dédicace soit une preuve éternelle de mon amour infini et de ma reconnaissance envers toi.

Je t'aime papa, pour toujours et au-delà des mots.

A ma mère,

Tu as été présente à chaque instant de ma vie, dans la joie comme dans l'épreuve, et plus que tout, tu as su être à la fois une mère tendre et un père courageux. Tu as tout donné sans jamais compter, tu as porté nos douleurs en silence, et tu t'es battue chaque jour pour que je ne manque de rien. Tu es l'exemple vivant du courage, du sacrifice et de l'amour pur.

Tu m'as appris à affronter la vie la tête haute, et à ne jamais renoncer. Par ta force tranquille et ton cœur immense, tu m'as donné tout ce dont une fille pouvait rêver. Chaque ligne de ce mémoire, chaque effort

fourni, porte ton empreinte. Ce mémoire t'est dédié, maman, en reconnaissance de tout ce que tu es et de tout ce que tu as fait pour moi. Tu es la lumière de ma vie, mon modèle, ma plus grande fierté.

Je t'aime plus que les mots ne puissent jamais le dire, et je te promets de toujours te rendre fière.

À ma tante Djamila,

Tu as été une seconde maman, douce, présente et réconfortante. Ta bienveillance et ton soutien ont été d'un immense réconfort. Merci pour ton amour silencieux et ton rôle si précieux dans ma vie.

À ma tata Jasmine,

Toi qui m'as bercée dès ma naissance et aimée jusqu'à ton dernier souffle, tu restes vivante dans mon cœur.

Ce mémoire est aussi pour toi. J'espère que, de là-haut, tu es fière de moi. Je t'aimerai

toujours.

*À mes cousins et cousines, pour leur affection sincère et leurs encouragements qui m'ont
rappelé que je n'étais
jamais seule sur ce chemin.*

*À ma sœur de cœur Nora, avec qui les liens du cœur ont souvent dépassé ceux du sang. Merci
d'avoir été là,
dans les joies comme dans les tempêtes.*

*À Thiziri, ma confidente, mon bras droit, merci d'avoir été cette présence fidèle, cette épaule
solide. Merci d'avoir marché à mes côtés, chaque jour, chaque nuit, sans jamais fléchir.*

*À mes amis : Faouzi ; Adel ; Amar ; Lyes ; Hmimi; Ouamar ; Salim ; Thilleli et a tous ce qui ne
sont pas mentionnés mais je porte dans mon cœur.
Merci pour vos encouragements.*

AKKOUL Lydia

Dédicace

« La réussite ne se mesure pas à ce que l'on obtient, mais à tout ce qu'il a fallu traverser pour y parvenir. »

Ce travail marque l'aboutissement d'un parcours riche en apprentissages, en défis et en belles rencontres. Je souhaite le dédier avec tout mon cœur à ceux qui ont toujours été à mes côtés, m'offrant leur soutien et leur affection indéfectible.

Je dédie ce travail :

A la douce mémoire de mon grand-père Chérif ;

tu as quitté ce monde, mais jamais mon cœur. A toi que la vie m'a enlevé bien trop tôt, mais dont l'empreinte reste gravée, indélébile, dans les souvenirs de mon enfance. Même si le temps nous a volés les années que nous aurions pu partager, même si je n'ai que quelques images, quelques gestes, ton absence a toujours été une présence silencieuse dans ma vie. Ton amour immense, pur, sacré, que tu avais pour cette petite fille que j'étais, je le sens encore comme une chaleur douce qui m'accompagne dans l'ombre, je le porte en moi, intact, vivant. Je t'aime d'un amour qui ne s'est jamais éteint malgré l'absence, qui grandit avec les années dans le silence de la mémoire. Ce mémoire, fruit de mon parcours, je te le dédie humblement, avec tout l'amour d'une petite fille devenue grande. En espérant que là où tu es, tu sois fier de moi, comme moi, je suis fière d'être ta petite fille.

A mes grands-mères, Fetta et Sadia,

femmes au cœur d'or, âmes douces, et bienveillantes. Que dieu vous accorde encore de longues années, remplies de sérénité, de paix et de santé.

A mon père, pour tout ce que tu es et tout ce que tu as fait, tu es mon modèle, ma fierté, et l'inspiration derrière chacun de mes pas. Celui qui m'a appris à ne jamais fléchir, à ne jamais baisser les bras.

À ma mère, ma force, mon équilibre, mon cœur te doit plus que je ne pourrai jamais écrire, ton amour infini est ma lumière, ton regard ma plus belle certitude. Tu m'as appris que le cœur donne du sens à toute réussite.

« Rien ne pourra jamais égaler l'amour inconditionnel que vous m'avez offert.

Que Dieu vous bénisse d'une longue vie et d'une santé paisible, vous êtes ma plus grande richesse. »

A mes sœurs, de sang et de cœur, Djouher et Cecilia,

mes âmes complices qui m'ont accompagné dans les joies comme dans les tempêtes, avec leur amour unique que seules des sœurs peuvent offrir.

A mon petit frère, mon ange Abdenour, ton innocence, ton rire et ta douceur m'ont rappelé chaque jour pourquoi il faut tenir bon. Tu es mon petit soleil, ma tendresse infinie, je suis fière d'être ta grande sœur.

Je t'aime fort.

A mon mari, mon compagnon de vie, de cœur et d'âme, mon refuge, mon roc. Ton amour, ta patience et ta foi en moi m'ont porté dans les moments les plus difficiles.

A toute ma chère famille, et ma belle-famille, pour leur amour, leur soutien, et encouragements

, votre présence et votre confiance, m'ont donné la force d'avancer.

Merci à vous tous, de près ou de loin, d'avoir cru en moi et d'avoir contribué à l'aboutissement de ce travail. Je vous aime. Que ce travail soit le reflet de mon engagement et de ma reconnaissance, et ma gratitude envers vous tous.

HADEF Romaiassa

Résumé :

Ce mémoire porte sur l'évaluation du potentiel aurifère et des métaux rares de la région de Tahifet (Hoggar central, Algérie) à travers une approche basée sur la modélisation géologique assistée par Système d'Information Géographique (SIG). Après une synthèse géologique générale du Hoggar et celle de géologie de la feuille de Tahifet, incluant l'analyse des informations lithologiques, structurales ; magmatiques, géochimiques et gîtologiques, les données nécessaires disponibles ont ensuite été intégrées dans un environnement SIG en utilisant le logiciel ArcGIS.

La méthode des poids de l'évidence (Weight of Evidence) implémentée dans Arc SDM sous ArcGIS a été appliquée pour croiser les différentes couches d'informations géoscientifiques sélectionnées comme données d'entrées afin de produire une carte de sortie appelée : ***carte du potentiel minéral***. Les résultats obtenus ont permis d'identifier plusieurs zones favorables à une future prospection, démontrant ainsi l'efficacité de l'approche utilisée.

Ce travail montre que l'utilisation des SIG et des méthodes d'analyse géostatistiques avancées peut significativement améliorer les stratégies d'exploration minière dans des contextes complexes comme celui du Hoggar.

Mots-clés : Tahifet, Hoggar central, SIG, modélisation, poids de l'évidence, or, métaux rares

Abstract:

This thesis focuses on evaluating the gold and rare metals potential of the Tahifet region (Central Hoggar, Algeria) through a geological modeling approach supported by Geographical Information Systems (GIS). Following a general geological synthesis of the Hoggar and the Tahifet region including lithological, structural, magmatic, geochemical and mineralization analysis. The available geoscientific dataset was integrated into a GIS environment using ArcGIS software.

The Weight of Evidence (WofE) statistical method, implemented in ArcSDM extension, has been applied to combine all the geoscientific dataset as input data in order to produce an output data called "mineral ***potential map***". The results identified several areas with high mineral potential, demonstrating the efficiency of used modeling technic and spatial analysis approach.

This study highlights the valuable role of GIS and geostatistical techniques in enhancing mineral exploration strategies in geologically complex regions such as the Hoggar region.

Keywords: Tahifet, Central Hoggar, GIS, modeling, Weight of Evidence, gold exploration, rare metal

Tableau 1: les avantages et inconvénient de mode Raster et Vecteur..... 39

Figure 1: Carte de situation et de structuration géographique de la région de Tahifet en	3
Figure 2: Carte géologique régionale de bouclier touareg.	6
Figure 3: Carte géologique de Hoggar occidental.	7
Figure 4: Log synthétique du Hoggar occidental.	9
Figure 5: Carte géologique du Hoggar central (Caby et al, 1981).	10
Figure 6: log synthétique du Hoggar central.	13
Figure 7: les terranes du Hoggar : Iskel (Isk), In Tedeini (It), Tin-Zaouatene (Za), Tirek (Tir), Ahnet (Ah), In Ouzzal (Ou), Unité granulitique des Iforas (Ugi), Tassendjanet (Tas), Kidal (Ki), Tilemsi (Ti), Timétrine (Tim), Laouni (La), Tefedest (Te), Azrou-n-	18
Figure 8: Carte schématique des différents domaines structuraux de la feuille de Tahifet (Briedj, 1993)	21
Figure 9: carte schématique des domaines structuraux de la carte de l'Aghefsa	28
Figure 10: Données alphanumériques et données spatiales.	36
Figure 11: les composants d'un SIG.	37
Figure 12: exemple de quelque donnée raster (BONNET M, 2012).	38
Figure 13: types de données vectorielles.	39
Figure 14: Description d'une fenêtre ArcMap.	42
Figure 15: Fenêtre ArcCatalog.	43
Figure 16: Interface Arc Toolbox.	43
Figure 17: Les parallèles et les méridiens constituant un graticule.	44
Figure 18: Globe terrestre avec les valeurs de longitude et de latitude.	45
Figure 19: Fuseaux horaires du sud de l'Algérie.	46
Figure 20: Connecter ArcCatalog à un dossier spécifique.	47
Figure 21: Mise en place d'un système de projection via ArcCatalog.	48
Figure 22: Définition de la référence spatiale dans ArcMap.	49
Figure 23: Géo référencement d'une carte dans ArcGIS.	50
Figure 24: Créer un fichier de formes.	51
Figure 25: Choix du type d'entités et du système de coordonnées.	52
Figure 26: Activer l'outil Éditeur.	53
Figure 27 : Ouvrir une nouvelle session de mise à jour.	53
Figure 28: Cas de vectorisation d'une couche géologique quaternaire dans la région	54
Figure 29: Résultat de la vectorisation des couches magmatique dans la région	55

Figure 30: Processus de vectorisation appliqué à une unité métamorphique dans la région de Tahifet sous ArcMap. -----	56
Figure 31: Vectorisation des structures tectoniques linéaires : exemple des failles. -----	57
Figure 32: transformation du catalogue des minéralisations (EREM ; Bezouglikh 1990) en fichier Excel -----	58
Figure 33: couche ponctuelle d'indices et gisements -----	59
Figure 34: couche ponctuelle d'AG -----	59
Figure 35: carte géologique vecteur simplifié de Tahifet.-----	60
Figure 36 : principe Bayésien de combinaisons prédictives. -----	61
Figure 37: sens physique de la probabilité antérieure. -----	62
Figure 38: Probabilité postérieur de D étant donné la présence de l'évidence E.-----	63
Figure 39: Probabilité postérieure de D sachant la présence de l'évidence E. -----	64
Figure 40: carte de probabilité postérieure de D sachant la présence de l'évidence B et E. -	65
Figure 41: Couche Néoprotérozoïque. -----	68
Figure 42: Couche granitegranodiorite. -----	68
Figure 43: Couverture. -----	68
Figure 44: Couche série Aleksod. -----	68
Figure 45: Couche série Arehchoum. -----	68
Figure 46: Couche diorite et gabbro. -----	68
Figure 47: indice de minéralisation. -----	69
Figure 48: AG.-----	69
Figure 49: vectorisation des failles. -----	69
Figure 50: Shape file obtenu à partir du fichier Excel minéralisations. -----	70
Figure 51: Carte d'Anomalies géochimiques. -----	70
Figure 52: Carte Tectonique. -----	70
Figure 53: Carte lithologique. -----	70
Figure 54: schéma montrant les différentes étapes de la modélisation Wofe -----	72
Figure 55: création de la carte binaire « Proximité de faille ». -----	73
Figure 56: création de la carte binaire « Densité de faille ».-----	73
Figure 57: création de la carte binaire « Anomalie géochimiques ». -----	74
Figure 58: carte du potentiel minéral (secteurs peu prospectés).-----	76
Figure 59: carte du potentiel minéral (avec nouveaux secteurs prospectés).-----	76

I. Introduction.....	1
I.2. But et l'objectif d'étude.....	2
I.3. Situation géographique.....	2
I.4. Travaux antérieurs.....	3
II.1. Géologie régionale du Hoggar	6
II.1.1. Ancienne subdivision.....	6
II.1.2. La chaîne pharusienne	7
II.1.2.1. La branche occidentale	7
II.1.2.1. La branche orientale.....	8
II.2. Le Hoggar central	10
II.2.1. Série de l'Arechchoum	11
II.2.2. La série de l'Aleksod.....	11
II.2.3. Le plutonisme.....	13
II.2.3.1. Tectonique et géochronologie	14
II.2.3.2. L'événement éburnéen (ou suggarien) – Environ 2000 Ma.....	14
II.2.3.3. L'événement panafricain – Environ 600 Ma.....	14
II.2.4. Synthèse des âges clés au Hoggar central	15
II.3. Le Hoggar oriental	15
II.3.1. Évolution tectonique.....	16
II.3.2. Implications géodynamiques	16
II.3.3. Subdivisions du Hoggar en terranes	17
II.4. Le volcanisme du Hoggar : Origine et Évolution.....	19
II.5. Conclusion	20
III.1. Introduction	21
III.2. Litho-stratigraphie et pétrographie	22
III.2.1. Région de l'Oua Helledjène	22
III.2.2. L'ensemble gneissique.....	22

Table des matières

III.2.2.1. Contenu lithologique	22
III.2.2.2. Caractéristiques pétrographiques	23
III.2.3. L'ensemble méta-sédimentaire	24
III.2.3.1. Contenu lithologique	24
III.2.3.2. Caractéristiques pétrographiques	24
III.2.4. Région de l'Aghefsa	25
III.2.5. L'unité d'immedeghdaghène	26
III.2.6. L'unité mollassique de l'Issouagh.....	27
III.2.7. Région de l'oued Tin TARABINE	27
III.3. Magmatisme	29
III.3.1. Magmatisme de l'Oua Héliedjène	29
III.3.2. Magmatisme ancien	29
III.3.3. Magmatisme pré-tectonique panafricain	30
III.4. Le volcanisme précoce de l'Aghefsa.....	31
III.4.1. Le plutonisme de l'Aghefsa	31
III.4.2. Tectonique	31
III.4.3. Oua Héliedjène	31
III.4.4. Minéralisation	32
III.5. Type Minéralisations	33
III.5.1. Minéralisations métalliques	33
III.5.2. Minéraux Ferreux	34
III.5.3. Minéraux Silicatés	34
III.5.4. Minéraux d'Altération et d'Argiles	34
III.5.5. Minéraux Carbonatés.....	34
III.6. Conclusion.....	35
IV.1. Introduction	36
IV.2. Définition d'un SIG.....	36

IV.3. Les composants d'un SIG.....	37
IV.4. Représentation des données dans un SIG	38
IV.4.1. Mode Raster.....	38
IV.4.2. Mode Vecteur	38
IV.5. Comparaison des modes vecteurs et rasters.....	39
IV.6. SIG et Géologie.....	40
IV.7.1. Les avantages d'un SIG	41
IV.7.2. SIG sous ArcGis	41
IV.7.2.1. Définition du logiciel ArcGis	41
IV.7.2.2. Présentation du logiciel ArcGis 10	41
IV.8. SIG appliqué sur la région d'étude	44
IV.8.1. Étapes suivies pour le traitement et vectorisation des cartes.....	44
IV.8.1.1. Rappels théoriques	44
IV.8.1.2. Géo-référencement	46
.....	50
IV.8.1.3. Vectorisation d'une carte	50
V.1. Introduction	61
V.2. Description de la méthode	61
V.2.1. La probabilité antérieure	62
V.2.2. La probabilité postérieure	63
V.2.3. Introduction du thème prédictif B.....	63
V.2.4. Introduction du thème prédictif E.....	64
V.3. Les paramètres statistiques WofE calculés.....	66
V.4. Étapes suivies pour la Modélisation géomatique prédictive	68
Conclusion.....	78
Références bibliographiques	

Chapitre I

Généralités

I. Introduction

Dans un contexte où la demande mondiale en ressources minérales, notamment l'or et également les métaux rares, ne cesse de croître, la prospection minière revêt une importance stratégique pour de nombreux pays. L'Algérie, dotée d'un vaste territoire riche en structures géologiques anciennes, possède un potentiel minier considérable, en particulier dans la région du Hoggar, au sud du pays. Cette zone constitue l'un des ensembles géologiques les plus complexes et les plus prometteurs du Bouclier Touarég, avec une histoire tectonique, magmatique et métamorphique riche, et des indices minéralisés observés dans plusieurs régions.

Au sud d'Alger, le Hoggar se trouve à environ 2000 km. Avec une superficie de 550 000 km², il représente la partie la plus importante du bouclier touareg. Au sud-ouest, il se prolonge au Mali par le massif des Adrar et des Iforas et à l'est, au Niger, par le massif de l'Aïr. Son socle est composé de terrains archéens, éburnéens et panafricains. Son actuelle structure, principalement formée pendant l'orogénèse panafricaine, est marquée par de vastes cisaillements N-S d'échelle continentale, les accidents 4°50' et 8°30', qui le divisent en trois grands domaines de l'Ouest vers l'Est : le Hoggar occidental, le Hoggar central polycyclique et le Hoggar oriental (Bertrand et Caby, 1978).

La région de Tahifet, située dans le Hoggar central, attire l'attention des géologues en raison de sa diversité lithologique, de ses structures tectoniques marquées et de la présence de plusieurs anomalies géochimiques favorables à la formation de gisements aurifères. Cependant, cette zone reste encore peu exploitée de manière systématique, notamment en ce qui concerne les méthodes modernes d'exploration minière intégrée.

L'objectif principal de ce mémoire est d'évaluer et de cartographier les zones à fort potentiel aurifère et à métaux rares dans cette région, en utilisant une approche basée sur la modélisation géologique par la méthode des Poids de l'Évidence (Weight of Evidence – WofE). Cette méthode, combinée à l'utilisation d'un Système d'Information Géographique (SIG) via le logiciel ArcGIS, permet d'intégrer et de croiser différentes couches d'information (géologiques, structurales, géochimiques...) pour produire une carte prédictive du potentiel minier.

La région de Tahifet, tout comme toutes les régions du Sud algérien, est confrontée à un manque d'eau qui entrave le développement humain, mais qui suscite le bonheur des géologues. Le Hoggar a été transformé en un immense affleurement de vieux vestiges protérozoïques en raison des effets conjoints des agents climatiques. Les pluies sont rares et fréquemment destructrices, les crues qu'elles provoquent emportant tout sur leur chemin. Dans le territoire étudié, les points d'eau permanents sont peu nombreux et se situent dans ses limites nord où se situe le

hameau de Tahifet (unique localité de la région). Une faune limitée (chameaux, mouflons, gazelles, chacals, lièvres, etc.) peut survivre à quelques gueltas (points d'eau non permanents). La flore est extrêmement pauvre, composée de touffes de graminées sauvages, d'armoïse et d'épineux dispersés, d'acacias déchiquetés et de tamaris. Le paysage est extrêmement escarpé. Il est difficile d'y accéder, surtout dans la partie nord où seuls les grands cours d'eau à écoulement NS sont accessibles par la route. En revanche, les reliefs offrent des conditions d'affleurement excellentes et permettent des observations dans les trois dimensions.

I.2. But et l'objectif d'étude

Le but principal de notre travail consiste à évaluer et cartographier les zones à fort potentiel aurifère dans la région de Tahifet, (Hoggar Central), en utilisant la modélisation géologique par la méthode des poids de l'évidence (Weight of Evidence, WofE) en combinant différentes sources de données géologiques, géophysiques, géochimiques et autres. Cette approche vise à fournir des cartes de probabilité indiquant les zones les plus susceptibles de contenir de l'or, ce qui facilite la gestion de prospection et de l'exploration minière.

Aujourd'hui les nouvelles technologies utilisées dans le domaine de la géologie facilitent le travail aux géologues pour délimiter, extraire et aller droit vers l'information. La méthode des poids de l'évidence repose sur une analyse statistique où l'on évalue la relation entre des variables explicatives (des paramètres géophysiques, géochimiques ou géologiques) et la distribution des événements d'intérêt (les zones aurifères). Elle attribue des "poids" aux différentes données en fonction de leur capacité à discriminer entre les zones minéralisées et les zones non minéralisées. Ce modèle est ensuite utilisé pour créer des cartes de probabilité du potentiel aurifère et des métaux rares.

I.3. Situation géographique

Tahifet se trouve dans le sud de l'Algérie, au cœur du massif du Hoggar et à une centaine de km à l'est de Tamanrasset. La surface cartographiée s'élève à environ 11000 km², ce qui correspond à la limite topographique régulière NF32XIII, qui est limitée par les coordonnées géographiques suivantes : longitude : 6° et 7° Est et latitude : 22° et 23° Nord. Sur la base d'arguments géomorphologiques et géologiques, il est possible de diviser cette région en trois grands domaines : d'Ouest en Est, il s'agit des domaines de l'Oua Helledjène, de l'Aghefsa et de Tin Tarabine, séparés par des accidents tectoniques majeurs (Briedj,1993).

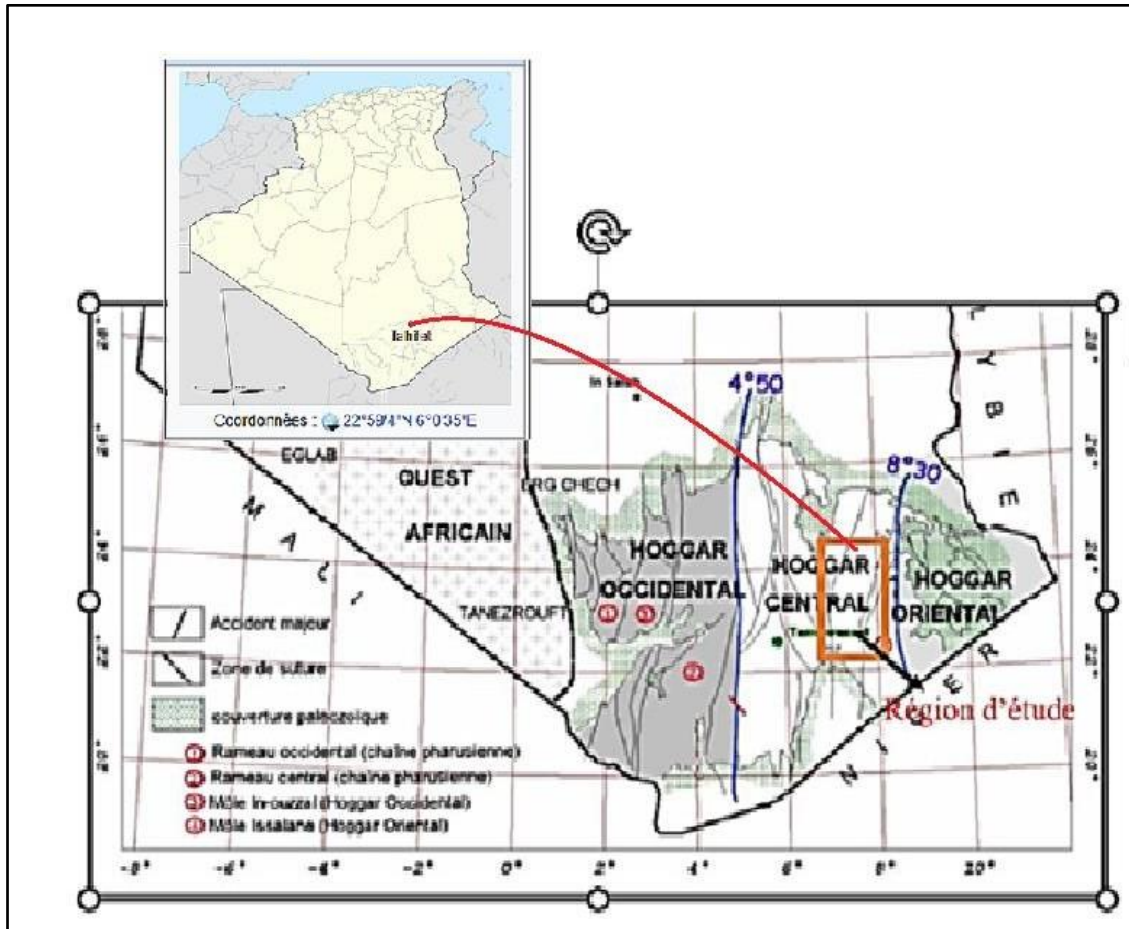


Figure 1: Carte de situation et de structuration géographique de la région de Tahifet en

I.4. Travaux antérieurs

Il y a peu de travaux antérieurs dans la région étudiée, à l'exception de la région du gisement de tungstène de Bachir, situé dans le Sud de la feuille cartographiée. Sur cette région, la Sonarem a effectué des prospections minières de détail de 1975 à 1978. Dans l'ordre chronologique, nous mentionnerons les travaux suivants.

1. *M. Lelubre (1952)* a réalisé une vaste coupe d'Est en Ouest dans la feuille Tahifet dans le cadre de son étude monumentale de l'ensemble du Hoggar.
2. Le Bureau de Recherche Minière d'Algérie (**BRMA**) a réalisé deux cartes géologiques partielles dans la région de Tahifet, à une échelle de 1/200 000°, dans la région de Tahifet.
3. La recherche et la prospection du gisement de Bachir (zone sud du territoire étudié) ont été menées entre 1975 et 1978 par la Société Nationale de Recherche et d'Exploitation Minière (SONAREM), laquelle a été découverte par la SONAREM en 1975 (*Sannikov*

et al 1979) et la prospection géologique dans le Hoggar central réalisée en 1975 (*Antonov et al 1976*).

4. La cartographie actuelle a été lancée en 1980 lors d'une étude photogéologique dirigée par M. J. M. Bertrand à Montpellier.
5. Entre 1981 et 1985, Ms M. Amokrane et M. Briedj ont réalisé des missions de reconnaissance et de levés géologiques, avec la collaboration de M. J. M. Bertrand pour le côté structural.
6. De 1986 à 1988 des missions de levés géologiques intensifs ont été réalisées par Mr M. Briedj avec la collaboration de Mr J. Leterrier pour le magmatisme de l'Aghefsa.
7. Des compléments de levés et une étude du magmatisme de l'Aghefsa ont été réalisés entre 1989 et 1993 dans le cadre de la préparation d'une thèse de doctorat (*Briedj 1993*) à l'université de Nancy (France), dirigée par Ms *J. Leterrier et J. M. Bertrand*.
8. D'autres études ont été menées avec l'université USTHB, telles que des thèses de magister ou de doctorat AMRI 2008.

Chapitre II
Géologie régionale du Hoggar

II.1. Géologie régionale du Hoggar

II.1.1. Ancienne subdivision

Durant l'orogénèse panafricaine, qui a eu lieu entre 800 et 600 Ma, une vaste zone de mobilités est constituée au Hoggar, située à l'est du craton ouest africain qui est demeuré stable durant le Protérozoïque moyen et supérieur.

Selon des théories convergentes, un cycle de Wilson aurait été déclenché aux alentours de 800 Ma. Il a pris fin il y a 600 millions d'années avec l'édification d'un orogène de collision, (*Bertrand et Caby 1978, Black et al 1979, Caby et al 1981*).

Les éléments les plus marquants du bouclier Touareg se composent de plis orientés nord-sud et de grands mouvements de cisaillement qui ont agi en tant que surfaces de glissement ou décalage.

Au Hoggar, trois zones structurales principales ont été identifiées, délimitées par des éléments linéaires majeurs (*Bertrand et Caby 1978*). De l'ouest vers l'est : La chaîne pharusienne, le Hoggar central polycyclique et le Hoggar oriental (**Fig. 2**).

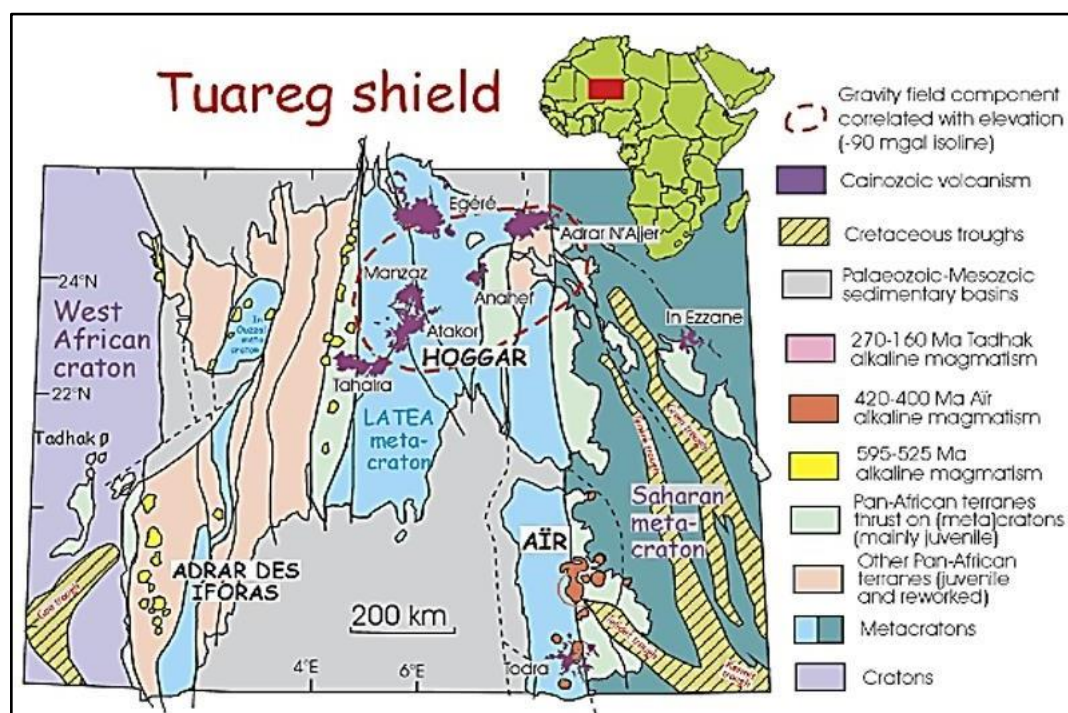


Figure 2: Carte géologique régionale de bouclier touareg.

II.1.2. La chaîne pharusienne

Cette chaîne est divisée en deux segments (occidental et oriental) par les unités granulitiques d'In Ouzzal et des Iforas, qui sont considérées comme représentant des couches de fond (*Boullier 1979*).

Excepté ces unités, la majorité de la chaîne se compose de formations du Protérozoïque moyen et supérieur (*Caby 1970*).

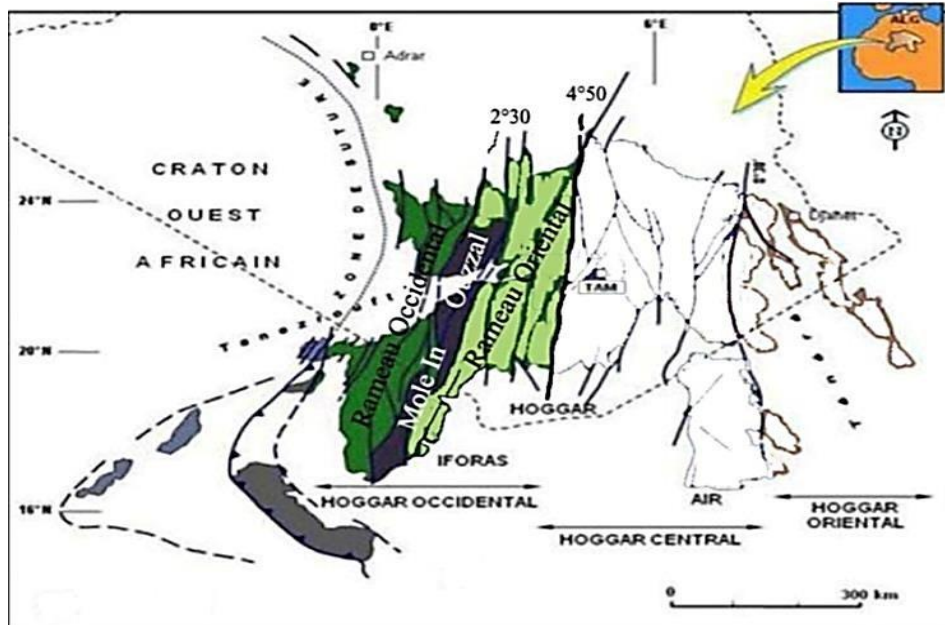


Figure 3: Carte géologique de Hoggar occidental.

II.1.2.1. La branche occidentale

Elle est constituée des formations lithologiques suivantes :

✓ **Formations granulitiques archéennes :**

Elles constituent deux larges bandes subméridiennes sur des centaines de kilomètres (In Ouzzal et Adrar des Iforas) qui divisent la chaîne pharusienne (**Fig.5**).

En deux segments distincts :

✓ **Formations du Protérozoïque moyen :**

Quartzites alumineuses, pélites et marbres, associés à des orthogneiss alcalins à subalcalins.

✓ **Formations du Protérozoïque supérieur :**

Elles sont constituées de quartzites, marbres et jaspes qui forment ce que l'on appelle une « série à stromatholites » (*Caby 1970*). À cette dernière, s'ajoutent des sills et laccolites de roche basique et ultrabasiqes.

✓ **Formations du Protérozoïque terminal :** Elles se subdivisent en deux séries :

- **Série verte** : constituée essentiellement de flysch, de grauwackes, de tufs et conglomérats avec des intercalations de laves andésitiques et dacitiques. Elle est recoupée par des sills de dolérites quartziques, de diabases et de granodiorites.
- **Série volcanique** : constituée de laves andésitiques, intercalées avec des pyroclastes et conglomérats polygéniques, des tufs et des grauwackes.

II.1.2.1. La branche orientale

Elle est caractérisée par la présence de deux cycles Tectono-métamorphiques successifs (*Bertrand et al 1966, Gravelle 1969*) : le Pharusien 1 et le Pharusien 2.

a. Le Pharusien 1 :

Ce domaine a récemment fait l'objet d'études dans la région de Silet. Il est constitué d'une série volcano-sédimentaire comprenant des formations sédimentaires (marbres, dolomies, quartzites et schistes chloriteux) intercalées avec des niveaux volcaniques. Ces derniers présentent une affinité calco-alkaline (*Fabriés & Gravelle, 1977; Chikhaoui, 1981*). L'ensemble a subi une déformation dans les conditions du faciès des schistes verts, datée entre 868 et 839 millions d'années. Ces âges correspondent respectivement à l'intrusion de corps calco-alkalins pré-tectoniques et post-tectoniques (*Caby et al., 1982*).

La première phase de déformation (D1) est marquée par des plis isoclinaux couchés, qui ont ensuite été repris au cours d'un second événement tectonique (D2). La direction du mouvement liée à D1, encore observable localement, est indiquée par une linéation d'étirement orientée est-ouest à nord-ouest-sud-est.

Le magmatisme plutonique associé se subdivise en deux groupes : un premier, plus ancien, composé de granodiorites et de diorites quartzifères accompagnées de corps gabbroïques ; et un second, plus récent et de nature granitique, recoupant les formations précédentes.

b. Le Pharusien 2 :

Ce secteur forme un vaste bassin volcano-sédimentaire localisé dans la partie orientale du domaine Pharusien, dans la région de Timgaouine. À sa base, une discordance marquée par un niveau discontinu de conglomérats (*Bertrand et al., 1966*) indique le début du dépôt. Cette base est surmontée par une succession de grès impurs et de pélites, avec, vers le sommet, une prédominance progressive des volcanites acides. L'épaisseur totale de la série est estimée à environ 4 km (*Haddoum, 1984*). Le magmatisme plutonique y est représenté par le batholite complexe d'Imezzarène, constitué d'unités tardi- à post-tectoniques. Contrairement au Pharusien 1, cette série n'est affectée que par l'événement tectonique D2, responsable de plis

ouverts à plans axiaux verticaux et à axes orientés nord-sud à N20°, ainsi que d'une schistosité axiale plus ou moins développée dans les conditions du faciès des schistes verts supérieurs.

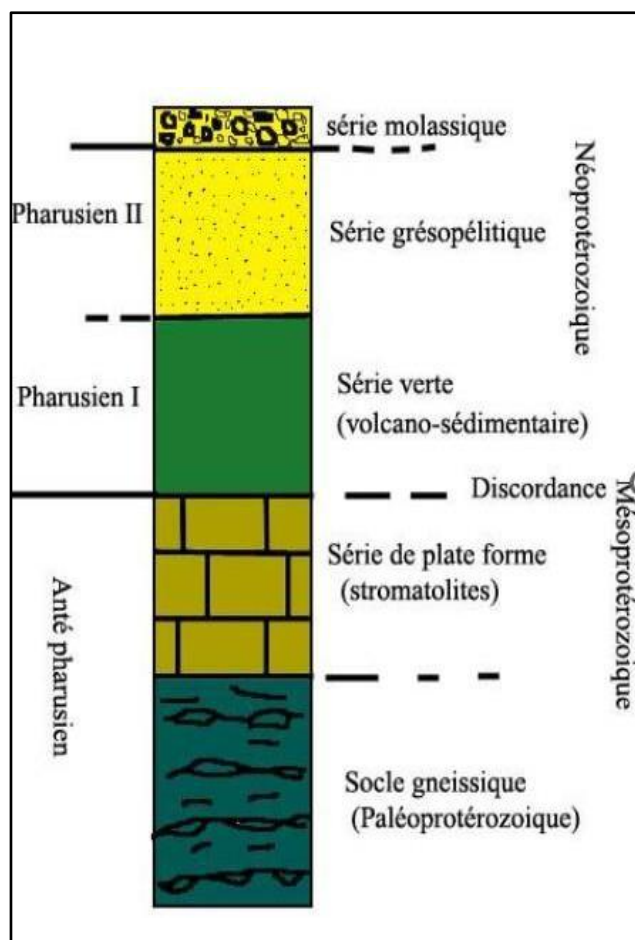


Figure 4: Log synthétique du Hoggar occidental.

Toutefois, la présence, à l'Est de ce domaine, dans la région d'Aouilène, d'une série volcano-sédimentaire similaire à celle du Pharusien II, mais affectée par une tectonique tangentielle panafricaine, soulève une problématique structurale importante.

En effet, la faible réactivation enregistrée dans le domaine de Timgaouine lors de l'épisode de charriage intracontinental (événement D2) suggère que cette zone a pu être structurellement isolée grâce à un mécanisme de type "copeau crustal" (Lapique et al., 1986). L'évolution tectonique majeure du domaine d'Aouilène, datée entre 619 et 614 Ma (Bertrand et al., 1986b ; Meriem, 1987), semble s'être concentrée le long de cette "zone de découplage", favorisant des mouvements décrochant sur ses bordures et un charriage vers le nord-est au cœur du dôme granito-gneissique.

Le magmatisme plutonique du Hoggar occidental reflète un processus géologique complexe, marqué par la mise en place de roches plutoniques dans un contexte tectonique actif,

où les magmas ont cristallisé lentement en profondeur. Ce magmatisme traduit une dynamique géologique intense, associée à des phases successives de subduction, d'orogénèse et de rifting, témoignant d'une évolution pétrologique riche et variée.

II.2. Le Hoggar central

Depuis les travaux pionniers de (*Lelubre, 1952*), les gneiss et granites du Hoggar central ont été traditionnellement considérés comme appartenant à la plus ancienne unité stratigraphique de la région (**Fig.5**).

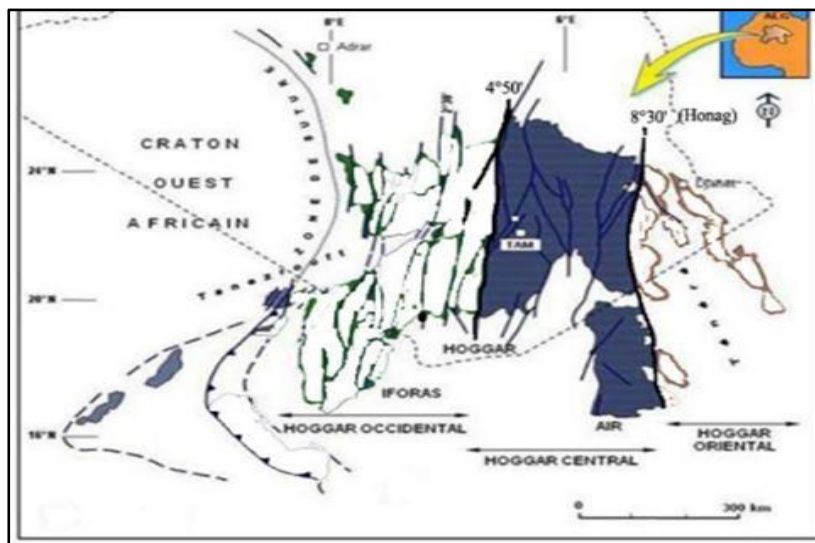


Figure 5: Carte géologique du Hoggar central (Caby et al, 1981).

Ces terrains métamorphiques de haut grade, regroupés sous le terme de "Suggarien", sont associés à des ceintures schisteuses de faible extension, historiquement identifiées comme représentant le Pharusien (*Killian, 1932 ; Lelubre, 1952*). Cependant, des observations de terrain récentes, combinées à de nouvelles données géochronologiques obtenues dans le Hoggar central, ont conduit à une réévaluation de l'histoire géotectonique initialement proposée (*Boullier & Bertrand, 1981 ; Bertrand et al., 1984*). Ces nouvelles interprétations remettent en question les modèles antérieurs (*Bertrand & Caby, 1978 ; Caby et al, 1981*), qui considéraient l'événement panafricain principalement comme un simple réchauffement thermique accompagné de plissements orientés selon un axe subméridien.

Trois grandes associations lithologiques ont été reconnues dans le Hoggar central, indépendamment de toute considération chronologique :

- Gneiss quartzo-feldspathiques et granites,

- Métasédiments rubanés de haut degré, comprenant quartzites, marbres et métapélites.
- Métavolcanites et grauwackes de bas degré.

La troisième association, généralement attribuée au Protérozoïque supérieur, correspond au Pharusien et constitue les ceintures schisteuses précédemment décrites. Pour ces trois ensembles, la foliation métamorphique principale, d'âge panafricain, se caractérise par un faible pendage, souvent subhorizontal, et est associée à une série de plis couchés polyphasés (*Bertrand, 1974 ; Latouche, 1978 ; Vitel, 1979*). Des exceptions sont toutefois observées à proximité des grands décrochements tardifs et dans certaines ceintures linéaires orientées nord-sud, où l'on trouve des plis droits.

Dans ce contexte, deux grandes séries litho-stratigraphiques ont été définies dans le Hoggar central : la série de l'Arechchoum et la série de l'Aleksod (*Bertrand, 1974*).

II.2.1. Série de l'Arechchoum

Cette série est dominée par des gneiss quartz feldspathiques, accompagnés de quelques unités méta-sédimentaires. Trois formations principales y sont étroitement liées : Gneiss rubanés plagioclasiques et granodiorites à tonalites, incluant de rares lentilles d'amphibolites. Les mobilisats associés sont à composition aplitique à trondhjémitique.

- **Formation méta-sédimentaire**, constituée de marbres, pyroxénites, quartzites souvent à clinopyroxène, micaschistes à biotite et sillimanite, ainsi que de gneiss plagioclasiques.
- **Gneiss ocellés**, souvent à texture amygdalaire, évoluant vers des gneiss granitoïdes roses homogènes, particulièrement bien développés dans la région de Tallat Mellet

II.2.2. La série de l'Aleksod

Reposant en discordance structurale sur la série de l'Arechchoum, cette série est principalement composée de méta sédiments. Une coupe synthétique a été établie dans la région éponyme, située à une centaine de kilomètres au nord de la zone d'étude. Elle se décompose, de la base vers le sommet, comme suit :

1. **Amphibolites massives à grenat**, recoupées par des pegmatites issues du socle. Ce niveau, très constant, constitue un bon marqueur cartographique pour identifier les lanières synclinales de la série de l'Aleksod.
2. **Formation gneissique**, dominée par des gneiss veinés plagioclasiques, parfois amphiboliques, accompagnés de gneiss fins à biotite, grenat, disthène et/ou sillimanite, ainsi que de gneiss à diopside. Cette formation débute localement par des quartzites à

muscovite.

3. **Formation calco-magnésienne**, regroupant des amphibolites massives à gros grenats, des pyroxénites, et des gneiss plagioclasiques enrichis en grenat, biotite et disthène. À sa base, on observe également des lentilles de quartzites à magnétite et cumingtonite. Dans la région de l'oued Tirehatine, les marbres et les pyroxénites sont particulièrement abondants vers le sommet de cette formation.
4. **Gneiss veinés leucocrates à muscovite**, caractérisés par une forte clarté minéralogique.
5. **Formation méta-sédimentaire**, débutant par un niveau distinct de gneiss plagioclasiques à disthène renfermant d'imposants cristaux de grenat atteignant jusqu'à 10 cm de diamètre. Cette formation se prolonge par des quartzites, des micaschistes alumineux à disthène, et des niveaux de marbres.
6. **Gneiss amphiboliques**, comprenant une large variété de faciès : gneiss à grenat et métadiorites, gneiss à muscovite et biotite, gneiss à biotite et grenat, ainsi que des gneiss à biotite, hornblende et grenat, ou encore des gneiss amphiboliques enrichis en grenat.

Bien que les métasédiments des séries de l'Arehchoum et de l'Aleksod présentent une lithologie très similaire, leur différenciation a été rendue possible, dans la région de l'Aleksod, grâce à la présence de dykes basiques, considérés comme un critère de distinction majeur (Bertrand, 197).

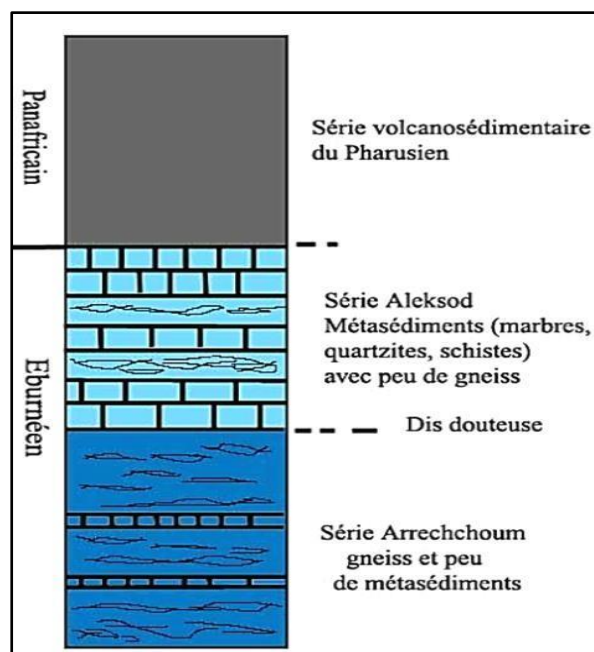


Figure 6: log synthétique du Hoggar central.

II.2.3. Le plutonisme

Le plutonisme granitique constitue un élément géologique majeur du compartiment central du Hoggar, en raison de l'important volume qu'il y occupe. Il s'est mis en place durant le cycle orogénique pharusien (également appelé panafricain), qui a fortement affecté la région. Une tentative de classification globale de ces granitoïdes a été proposée par (Vitel,1977), distinguant trois grands groupes :

1. **Groupe I (GI)** : Il regroupe les granitoïdes contemporains des phases de plissement associées à l'orogénèse pharusienne. Ce groupe est largement dominant. Les corps granitiques présentent des modes d'intrusion comparables et des similarités de composition chimique et minéralogique avec les granites synorogéniques du type Anfeg, décrits par Deschamps (1973) et Moulahoum (1988).
2. **Groupe II (GII)** : Moins représenté en volume, il comprend notamment le massif de Tifferkit, situé dans la région de Tamanrasset. Ces roches pourraient dériver de sources plus profondes, en raison de leur association fréquente avec des roches basiques.
3. **Groupe III (GIII)** : Il comprend des intrusions circulaires post-tectoniques, telles que celles des Taourirt, datées du Cambrien. Ces granites anorogéniques marquent la phase terminale du cycle panafricain (Boissonnas, 1973).

Ces trois types de granitoïdes se sont mis en place à des niveaux structuraux distincts les premiers (GI) dans un domaine d'infrastructure, les seconds (GII) dans un contexte de cratonisation progressive, et les derniers (GIII) à des niveaux de plus en plus superficiels.

II.2.3.1. Tectonique et géochronologie

L'évolution géodynamique du Hoggar central témoigne d'une superposition entre l'influence du socle suggarien (ou éburnéen) et les effets de l'orogénèse panafricaine. Les assemblages granulitiques et les gneiss antérieurs à l'intrusion des dykes basiques sont attribués à l'événement suggarien, sur la base de leur architecture structurale, de la morphologie des zircons et de leurs âges radiométriques, avoisinant les **2000 Ma** (*Latouche, 1978 ; Vitel, 1979 ; Ouzegane, 1981*).

Les données géochronologiques disponibles permettent de distinguer deux grands événements tectono-métamorphiques dans le Hoggar central : l'événement éburnéen et l'événement panafricain. Il convient également de noter la mise en évidence d'âges archéens dans la région de Gour Oumellalen, obtenus sur des gneiss par *Latouche et Vidal (1974)*.

II.2.3.2. L'événement éburnéen (ou suggarien) – Environ 2000 Ma

Cet événement ancien a été mis en évidence à travers la datation de gneiss quartzo-feldspathiques, incluant des orthogneiss et des charnockites, ainsi que des métasédiments parmi les plus anciens du Hoggar central (*Bertrand & Lasserre, 1976 ; Vialette & Vitel, 1981 ; Latouche & Vidal, 1974 ; Bertrand et al. 1984 ; Barbey et al. 1989*). En particulier, les granulites d'Ihérane (*Bertrand et al. 1986b*) ont livré un âge de 2075 Ma, confirmant les précédentes données relatives aux plus vieux éléments gneissiques et granulitiques de la région. Cet âge témoigne de la préservation locale de l'empreinte métamorphique suggarienne.

Un intercepte inférieur à 570 ± 70 Ma, corroboré par les âges de monazites et de sphènes, est interprété comme le résultat d'une perte de plomb liée à un épisode thermique ultérieur. Cette altération est survenue lors du métamorphisme panafricain, sous les conditions du faciès amphibolite.

II.2.3.3. L'événement panafricain – Environ 600 Ma

Correspondant à la phase majeure d'orogénèse panafricaine, cet événement a été largement documenté (*Piccioto et al., 1965 ; Bertrand et al., 1978*). L'analyse structurale met en évidence une forte corrélation entre l'évolution tectono-métamorphique du Hoggar central et l'intrusion massive de plutons granitiques syn- à tardi-tectoniques. L'exemple emblématique en est le pluton d'Anfeg, daté par la méthode U-Pb à 615 ± 5 Ma (*Bertrand et al., 1984 ; 1986a*), en accord avec les premières datations de Piccioto et al. (1965). Contrairement à l'interprétation d'un simple réajustement tectonique limité d'un socle éburnéen (*Bertrand & Caby, 1978 ; Latouche, 1978*), ces résultats appuient l'hypothèse d'une réactivation tectono-métamorphique

quasi complète à cette période, ne laissant subsister que quelques reliques de structures anciennes, préservées sous forme de lentilles tectoniques de tailles variées.

II.2.4. Synthèse des âges clés au Hoggar central

Outre le socle suggarien daté et les âges archéens localisés (*Latouche, 1978*), aucun événement géologique majeur antérieur à 600 Ma n'a été démontré avec certitude dans le Hoggar central. Trois étapes temporelles essentielles se dégagent :

- **615–600 Ma** : Intrusion des granitoïdes syn- à tardi-tectoniques sous forme de grands corps en feuillets, parallèles à la refoliation du socle ancien.
- **590–580 Ma** : Phase de refroidissement de la chaîne et fin du métamorphisme. Cet intervalle marque également l'apparition des premiers granites post-tectoniques du type Taourirt (*Latouche & Vidal, 1974*). Plus récemment, le granite de Tiferkit (sud de Tamanrasset) a été daté à 570 Ma par la méthode Rb/Sr (*Cheilletz et al. 1992*).
- **515 Ma** : Âge du granite Taourirt le plus jeune connu (*Vialette & Vitel, 1981*).

La synchronisation remarquable de ces mises en place granitiques dans différentes régions du bouclier du Nigéria central au Hoggar oriental souligne l'ampleur de cet événement Tectonmagmatique. Dans la zone de suture panafricaine, il coïncide avec une phase de **collision continentale** (*Black et al. 1979*).

Cependant, l'existence de charriages panafricains dirigés du sud vers le nord, ou vers le nord-est (observés dans les Iforas et au Hoggar central ; (*Bertrand et al, 1984 ; Latouche, 1985*), n'est pas compatible avec une simple collision est-ouest avec le craton ouest-africain. Deux scénarios alternatifs sont proposés :

- Un poinçonnement latéral du bouclier du Hoggar, induit par la forme angulaire du craton ouest-africain, ayant provoqué des déplacements de blocs vers le NNE (*Boullier, 1982 ; Liégeois et al, 1987 ; Boullier, 1991*).
- Une collision multi continentale complexe, impliquant plusieurs masses continentales (*Cheilletz, 1992*).

Cependant, les lacunes persistantes dans la cartographie structurale détaillée limitent encore aujourd'hui la possibilité d'établir une synthèse globale de l'histoire tectonique et chronologique du nord de la chaîne transsaharienne.

II.3. Le Hoggar oriental

Ce secteur, l'un des moins explorés du Hoggar, se divise en deux principaux ensembles structuraux :

- **La chaîne linéaire de Tiririne**, étroite et bien individualisée,
- **Le bloc de Tafassasset-Djanet**, plus vaste.

➤ **La chaîne de Tiririne :**

Entièrement évoluée dans une croûte continentale de type sialique (*Blaise, 1967 ; Bertrand et al, 1968 ; 1978*), elle s'est développée le long du grand linéament du 8°30'. Son socle est daté du Panafricain précoce. Les formations méta-sédimentaires, déposées avant 660 Ma, ont ensuite subi une phase de plissement et de métamorphisme intense durant l'orogénèse panafricaine (entre 600 et 580 Ma).

➤ **Le bloc Tafassasset-Djanet :**

Ce domaine est marqué par la présence de nombreux batholites calco-alcalins syn- à tardi-tectoniques, intrusifs dans une séquence méta-sédimentaire faiblement métamorphisée, dont l'âge exact demeure inconnu.

II.3.1. Évolution tectonique

La tectonique de cette région est complexe et se traduit par plusieurs phases successives de déformation :

1. **Phase P₁ (isoclinale précoce)** : Elle génère de grandes structures isoclinales couchées. Le degré de métamorphisme reste indéterminé, bien que des reliques de disthène aient été identifiées, préservées sous forme de cristaux blindés.
2. **Phase P₂ (isoclinale principale)** : D'axe moyen orienté N290°–310°, elle affecte les rubanements et linéations antérieurs. Cette phase est associée à un métamorphisme de basse pression, caractérisé par la présence de sillimanite et cordiérite, et s'accompagne d'un développement migmatitique important.
3. **Phase tardive** : Elle produit des plis à directions d'axes variables, influencées par la proximité du contact oriental avec le linéament tiririnien. Ces plis se superposent aux structures P₁ et P₂, tout en étant associés à une rétomorphose des migmatites.

II.3.2. Implications géodynamiques

L'ensemble des données structurales, pétrographiques et chronologiques recueillies à l'échelle du bouclier a permis de reconstituer un cycle orogénique de type Wilson, initié autour de 800 Ma et clos vers 600 Ma, à proximité de la suture avec le craton ouest-africain.

Cependant, plusieurs incertitudes demeurent, notamment concernant le synchronisme des phases tectoniques et magmatiques observées, et leur caractère ubiquiste dans toute la chaîne

transsaharienne. Ces problématiques feront l'objet d'une discussion approfondie dans la conclusion, en s'appuyant sur les observations structurales détaillées ainsi que sur les résultats d'analyses pétrographiques et géochimiques réalisés dans la région étudiée.

II.3.3. Subdivisons du Hoggar en terranes

Le Hoggar est subdivisé en 25 terranes distincts, chacun ayant ses propres caractéristiques lithologiques et structurales (*Liégeois 2019*), (**Fig.7**).

Les 25 terranes du Hoggar se sont principalement formés au cours de l'orogénèse panafricaine, qui s'est déroulée entre 750 et 550 Ma (*Liégeois 2019*). Ce processus a conduit à l'amalgamation de plusieurs blocs tectoniques, déplacés le long de vastes zones de cisaillement. Les études géologiques révèlent que ces terranes ont été profondément remodelés par d'importants événements tectoniques, ce qui a façonné leur configuration actuelle.

Les terranes du Hoggar sont ainsi classés en fonction de leur âge et de leur composition, et se répartissent en trois grands groupes.

Parmi les terranes néoproterozoïques du Hoggar occidental, on retrouve :

1. Silet, Iskel (Isk), In Tedeini (It), Tin-Zaouatene (Za), Tirek (Tir), Ahnet (Ah), In Ouzzal (Ou), Unité granulitique des Iforas (Ugi), Tassendjanet (Tas), Kidal (Ki), Tilemsi (Ti), Timétrine (Tim).
2. Les principaux terranes du Hoggar central sont des terrains paléoproterozoïques.
3. Laouni (La), Tefedest (Te), Azrou-n-Fad (Az), Egéré-Aleksod (Eg), Tchilit (Tch), Sérouenout (Se), Tazat (Ta), Assodé-Issalane (As-Is). Les principaux terranes du Hoggar Oriental sont constitués de formations plutono-volcaniques néoproterozoïques.
4. Barghot (Ba), Aouzegueur (Ao), Edembo (Ed), Djanet (Dj).

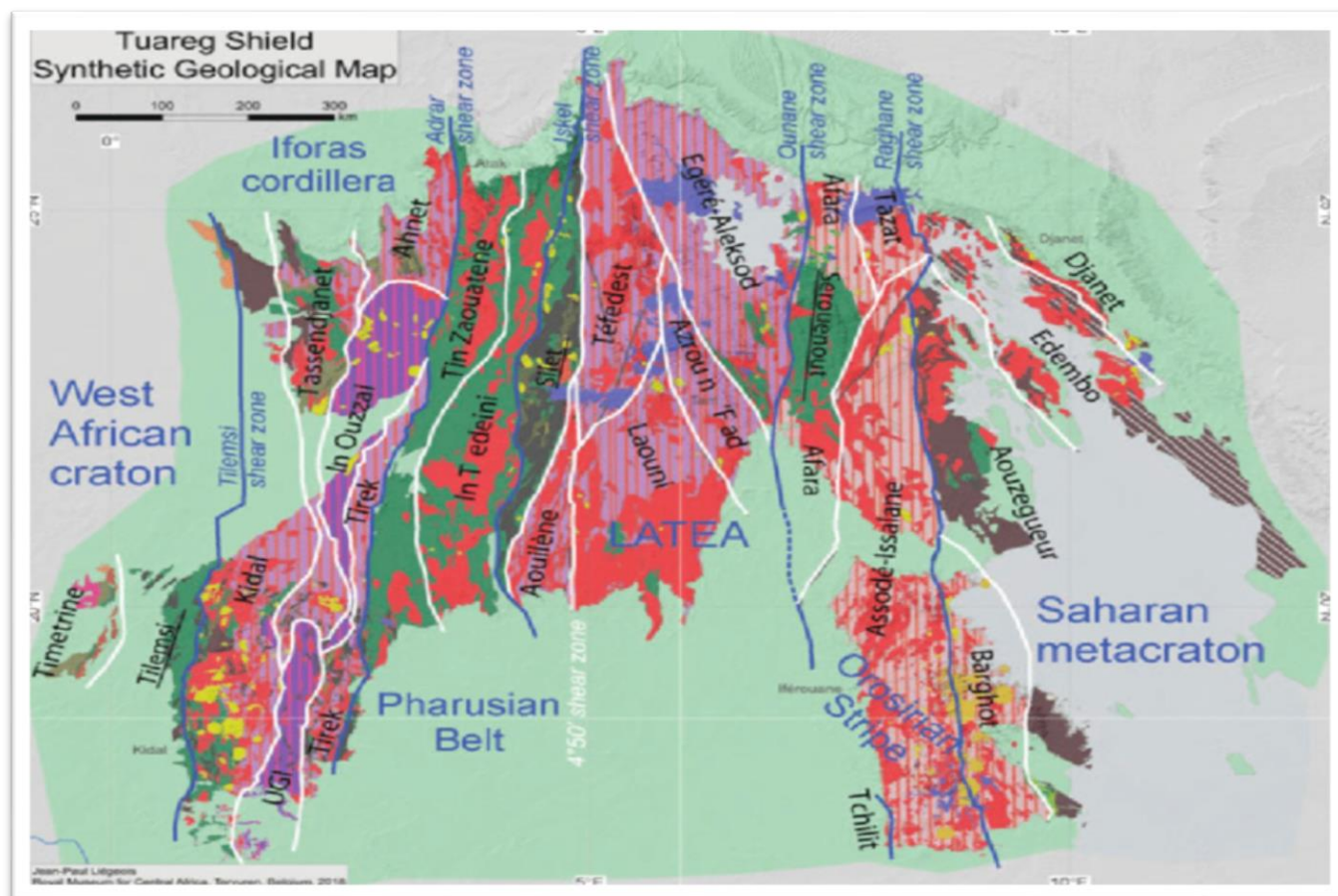


Figure 7: les terranes du Hoggar : Iskel (Isk), In Tedeini (It), Tin-Zaouatene (Za), Tirek (Tir), Ahnet (Ah), In Ouzzal (Ou), Unité granulitique des Iforas (Ugi), Tassendjanet (Tas), Kidal (Ki), Tilemsi (Ti), Timétrine (Tim), Laoumi (La), Tefedest (Te), Azrou-n-

Ces terranes présentent des caractéristiques lithologiques distinctes, tant sur le plan métamorphisme que magmatisme, ainsi que des structures différentes. Leur assemblage s'est produit au cours de deux phases principales (*Bertrand et Al 1978, Liégeois 2003*), faisant suite à deux collisions majeures :

- La première, survenue il y a environ 700 millions d'années, impliquait une collision entre le craton ouest-africain, agissant comme une marge passive, et la partie orientale du bouclier touareg.
- La deuxième collision, de nature oblique, s'est produite entre le craton ouest- africain à l'ouest et le craton Est-Africain, entre 630 et 525 millions d'années (*Bertrand et al, 1978*).

II.4. Le volcanisme du Hoggar : Origine et Évolution

Le massif du Hoggar, situé au cœur du Sahara, présente un volcanisme intraplaque complexe, actif du Cénozoïque au Quaternaire. Il se manifeste par une grande variété de roches volcaniques (basaltes, rhyolites), des coulées de lave et dômes volcaniques, témoins d'une activité éruptive prolongée.

Plusieurs hypothèses ont été avancées pour expliquer l'origine du bombement du Bouclier Touareg et le magmatisme cénozoïque associé :

1. Anomalie mantellique chimique (*Lesquer et al., 1988, 1989 ; Dautria & Lesquer, 1989*) :
À partir de données géophysiques (flux de chaleur, xénolites, gravimétrie), ils suggèrent une anomalie de densité dans le manteau (de forme elliptique, 400 x 200 km, à 50 km de profondeur), liée à une composition chimique particulière, héritée d'une anomalie thermique d'âge Crétacé.
2. Impact d'un panache mantellique à l'Éocène (*Aït Hamou & Dautria, 1994 ; Aït Hamou et al., 2000*) :
Ces auteurs proposent qu'un panache mantellique ait frappé la lithosphère à l'Éocène, générant le volcanisme tholéitique observé. La migration de la plaque africaine aurait ensuite éloigné le panache, mais un réchauffement localisé aurait entretenu le volcanisme jusqu'au Quaternaire.
3. Réactivation tectonique et convection de bordure (*Liégeois et al., 2005*) :
Le magmatisme serait lié à une réactivation des failles précambriennes durant la compression alpine à l'Éocène supérieur. Cette réactivation aurait permis des remontées mantelliques linéaires, facilitant la convection de bordure (Edge-Driven Convection).
4. Remontée asthénosphérique au Miocène (*Beccaluva et al., 2007*) : L'étude révèle une signature asthénosphérique dans les roches volcaniques miocènes. L'activité magmatique aurait été prolongée par une remontée d'asthénosphère du manteau supérieur, affectant la lithosphère du Hoggar.

Caractéristiques volcaniques du Hoggar

Selon Girod (1971) et Dautria (1988), le Hoggar se distingue par une grande diversité de roches et structures volcaniques, illustrant un volcanisme intraplaque typique :

- Basaltes et rhyolites,
- Coulées de lave et dômes volcaniques,
- Structures liées à des points chauds éloignés des limites de plaques.

II.5. Conclusion

En conclusion le volcanisme du Hoggar est le fruit d'interactions complexes entre anomalies mantelliques, panaches, remontées asthénosphériques et réactivations tectoniques.

Les recherches menées par Girod, Dautria, Lesquer, Aït Hamou, Liégeois, Beccaluva et d'autres ont enrichi la compréhension de cette région saharienne, essentielle pour reconstituer l'histoire géologique de l'Afrique.

Chapitre III
Géologie de la feuille de Tahifet

III.1. Introduction

Implantée entre les longitudes (6°-7°) Est et les latitudes (22°-23°) Nord, la feuille de Tahifet se localise au centre du Hoggar. Cette région est caractérisée par un paysage formé de petites montagnes entrecoupées de nombreuses vallées. Bien qu'elle soit généralement accessible, certaines zones restent inhospitalières pour les véhicules, notamment celles correspondant aux niveaux supérieurs de la série de l'Aleksod, aux blocs de roches pharusiennes, ainsi qu'aux fenêtres d'érosion dans les nappes basaltiques. Divers travaux ont contribué à l'étude de cette région, notamment (*BRIEDJ, 1993*). Ces recherches, basées sur les travaux de (*Lelubre, 1952*), ont permis d'identifier les grands ensembles litho-stratigraphiques et magmatiques de la région. Cependant, cette région reste complexe pour plusieurs raisons :

Les processus métamorphiques, influençant de manière différente des formations géologiques similaires. Les changements latéraux de faciès, souvent significatifs sur une superficie d'environ 10 000 km², rendant les corrélations intersectorielles délicates. La répartition des affleurements révèle trois grands domaines structuraux (**Fig.8**), séparées par des contacts tectoniques importants :

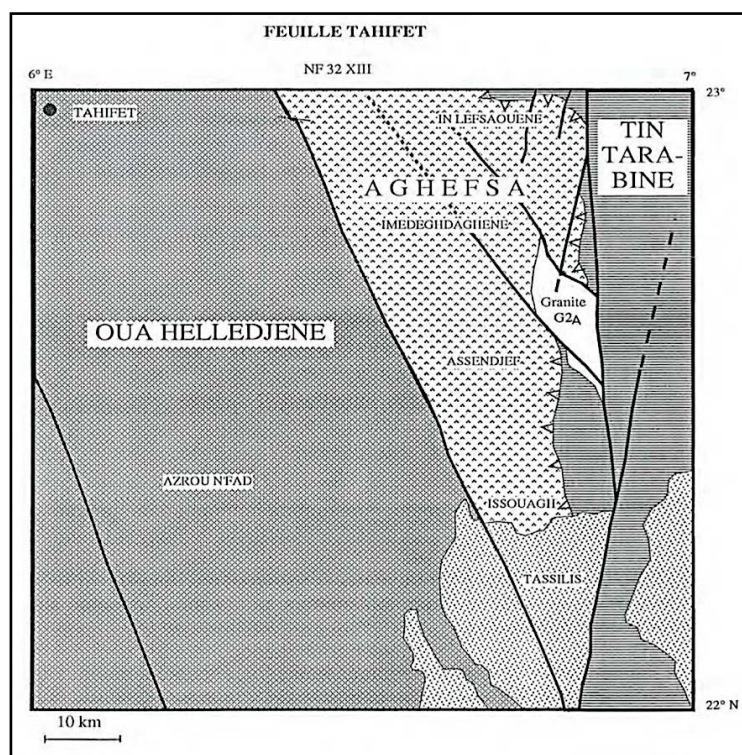


Figure 8: Carte schématique des différents domaines structuraux de la feuille de Tahifet (Briedj, 1993)

Les déformations tectoniques majeures, qui induisent des répétitions de séries, comme dans la région d'Egéré, où (*Duplan,1972*) a produit une cartographie remarquable, sans considérer les empilements précoces de nappes décrits par (*Latouche,1985*).

La région de l'Oua Helledjène, composée principalement de terrains gneissiques à dominante méta-sédimentaire. La région de l'Aghefsa, comprenant des unités volcano-détritiques soumises à un métamorphisme faible à moyen. La vallée de l'oued Tin Tarabine, dominée par des gneiss granitiques avec des apports limités de méta-sédiments.

Ces subdivisions géologiques reflètent la richesse et la complexité de la feuille de Tahifet, tout en mettant en évidence l'importance des phénomènes tectoniques, métamorphiques et litho-stratigraphiques dans l'organisation de ses formations.

III.2. Litho-stratigraphie et pétrographie

III.2.1. Région de l'Oua Helledjène

Elle est entourée de différentes formations, la région est bordée au Nord par les reliefs du massif volcanique de l'Atakor et à l'Est par l'Oued Afara Héouhine. Elle se distingue par deux formations litho-stratigraphiques : la première monotone, est principalement constituée de gneiss granitiques et d'amphibolites, qui occupe les dépressions, et la seconde est composée de gneiss méta-sédimentaires (quartzites et marbres) qui forme les zones montagneuses. On peut facilement identifier le contact entre ces ensembles sur le terrain, en particulier par la disparité de couleurs et de lithologies, ce qui laisse supposer une discontinuité géologique. Toutefois, à l'interface entre les deux ensembles se trouvent quelques lentilles d'éclogites. Dans des régions géologiquement similaires, telles que l'Aleksod, des discordances sont tectoniques observés où un socle gneissique est surmonté d'une couverture méta-sédimentaire.

Malgré l'absence d'arguments clairs sur ce site, la similarité avec d'autres régions suggère que le socle gneissique pourrait correspondre à la série de l'Arechchoum, tandis que l'ensemble méta-sédimentaire pourrait être lié à la série de l'Aleksod.

III.2.2. L'ensemble gneissique

III.2.2.1. Contenu lithologique

Cet ensemble géologique se manifeste par des dômes plurikilométriques composés de séries monotones de gneiss granitiques (contenant de la biotite et parfois de l'amphibole), souvent accompagnés de gneiss dioritiques et d'amphibolites en bancs fins ou en lentilles métriques.

Ces gneiss présentent une mobilisation importante, caractérisée par une structure veinée

et des filons pegmatitiques plissés. On y trouve également de rares intercalations de marbres et de quartzites, parfois à muscovite, sillimanite, et rarement à grenat. Les formations gneissiques incluent aussi de puissants massifs concordants d'orthogneiss granitiques et des lentilles de gabbro-diorites. Les corps basiques, plus contrastés en couleur, sont relativement faciles à cartographier sur le terrain et via des photos aériennes, contrairement aux massifs granitiques, dont la composition minéralogique, souvent proche de celle des roches encaissantes, complique leur distinction.

III.2.2.2. Caractéristiques pétrographiques

Les principaux faciès de cet ensemble géologique sont dominés par des gneiss granitiques à granodioritiques, souvent migmatitiques, alternant avec des niveaux dioritiques. Plus rares sont les gneiss à biotite et grenat, parfois enrichis en sillimanite, ainsi que des passées d'amphibolites. De rares niveaux métriques de quartzites et de marbres sont également interstratifiés dans ces gneiss, avec des lentilles d'éclogites parfois emballées dans les gneiss granitiques, sont décrites dans cet ensemble de base :

- a. **Les gneiss granitiques à granodioritique** : roches de couleur gris clair à rose, riches en quartz, feldspaths, avec des plagioclases dominants. Biotite omniprésente et minéraux accessoires tels que l'apatite et le zircon.
- b. **Les niveaux dioritiques** : Roches vert clair à foncé, dominées par la hornblende et de la biotite, avec un plagioclase abondant (andésine) et un quartz rare. Minéraux accessoires : apatite et épidote secondaire
- c. **Les passées d'amphibolites** : Roches noires formant des niveaux minces, souvent boudinées, et traversées par des filonets pegmatitiques plissés.
- d. **Les gneiss à biotite et grenat** : Présentent une alternance de lits clairs et sombres avec des nodules de cordiérite (pinnite).
- e. **Les gneiss à grenat et sillimanite** : Roches grises riches en plagioclases altérés et sillimanite en petits prismes, avec des grenats sub-automorphes et de la biotite.
- f. **Les gneiss migmatitiques** : Contiennent des filonets pegmatitiques plissés, parfois nébulitiques avec transition vers des granites.
- g. **Les amphibolites à grenat** : Lentilles rocheuses importantes dans la reconstruction géologique, présentant une zonalité minérale caractéristique, avec des paragenèses éclogitiques et une rétro-morphose hydratée.

III.2.3. L'ensemble méta-sédimentaire

III.2.3.1. Contenu lithologique

Étant donné l'impact de la tectonique intense sur ces différents ensembles, il est difficile, de distinguer clairement ce qui est interstratifié tectoniquement de ce qui est en contact stratigraphique. En outre, les formations de gneiss à sillimanite et grenat, ainsi que des niveaux de quartzites et de marbres, sont étroitement liés aux gneiss de base. Cette série a été déjà décrite dans l'Aleksod (*Bertrand, 1974*) et dans l'Amsinassène (*Vitel, 1979*).

La présence de grandes unités de métasédiments se manifeste toujours dans de vastes synformes à pendages ; et leur ossature quartzitique constitue les reliefs les plus importants de la région (Ileman Oulnine, In Tekrioua et Ayelloum). Trois grandes unités lithologiques ont été décrites (*Briedj 1993*).

1. Des quartzites ferrugineux en bancs discontinus (0,50 à 1 m d'épaisseur) qui sont toujours au contact des gneiss du « socle » présumé, ces quartzites également massives et pures (10 à 300 m d'épaisseur apparente) sont à débit en plaquettes (quartzites à muscovite et sillimanite).
2. Des niveaux de marbres purs, saccharoïdes, ou à minéraux (pyroxène, épidote, sillimanite, plagioclase). Sont souvent laminés dans les flancs de plis et épaissis dans les charnières. Les épaisseurs varient de 2m dans les flancs à 300 m dans les charnières.
3. Une série très épaisse (estimée à 3-4 km) et monotone de gneiss à biotite, sillimanite, grenat et (rare) cordiérite, avec des intercalations de micaschistes à biotite, sillimanite et grenat, de quartzites (purs ou à minéraux), de marbres et de gneiss calciques (à pyroxène et épidote) en bancs métriques.

III.2.3.2. Caractéristiques pétrographiques

L'ensemble méta-sédimentaire est formé de gneiss, micaschistes, quartzites et roches calciques avec un faciès amphiboles origine magmatique.

- **Les gneiss :**

Sont à biotite, sillimanite, grenat, et parfois cordiérite, (épaisseur apparente de 2 à 3 km). Ces gneiss, contiennent des feldspaths potassiques (15-20%), du plagioclase altéré (25- 30%), et du quartz (20-25%) recristallisé. La sillimanite (5-10%) est orientée parallèlement à la foliation, de même que la biotite (20-30%), tandis que le grenat est présent en grande quantité (5-10%). La cordiérite est rare et reconnaissable par ses macles. Dans les gneiss à biotite et grenat, on trouve du quartz (30-35%), de l'orthose perthitique et du microcline (15-20%), et du plagioclase (25-

30%) avec une concentration d'An de 20-25%. Le grenat (1%) présente des fissures remplies de plagioclases et de biotite, avec des inclusions de zircon dans la biotite.

- Les gneiss à deux micas se distinguent par leur texture œillée, composée de quartz et de feldspaths (plagioclases altérés, orthose, microcline), où la muscovite est associée à la biotite.
 - Les gneiss à amphibole sont rares et observés dans l'Oued Azrou, associés à des quartzites et des marbres. Ils montrent une structure en ruban, avec des lits riches en hornblende bien conservée et des lits quartzo-feldspathiques contenant des plagioclases altérés et peu de biotite.
1. **Les micaschistes** : Les micaschistes à biotite, grenat et sillimanite muscovite et biotite.
 2. **Les quartzites** : sont généralement massifs, ou en plaquettes, et contiennent du quartz (90%) accompagné de biotite, de muscovite et de sillimanite, ainsi que de rares plagioclases.
 3. **Les roches calciques** : comprennent les marbres purs, les marbres à minéraux et les gneiss calciques de différentes couleurs (souvent blanc à bleuté) de taille importante à aspect saccharoïde, ou rubanés et riches en silicates, notamment le diopside.

III.2.4. Région de l'Aghefsa

Au Nord, à l'Est et à l'Ouest, cette zone est marquée par des contacts tectoniques importants et au Sud, par des granites tardi/post-tectoniques et des grès ordoviciens. Elle se distingue par des formations volcano-détritiques et terrigènes avec un plutonisme abondant. Ces terrains attribués au "Pharusien" (*Kilian, 1932 ; Lelubre, 1952*), sont situées à proximité de l'Oued Sersouf, où la discordance stratigraphique entre le Pharusien et le Suggarien a été identifiée. Les gneiss du "Suggarien" et les formations volcano-détritiques sont toujours en contact tectonique, sans discordance stratigraphique constatée. Selon Kilian et Lelubre, les conglomérats métamorphiques qui constituaient la base du Pharusien sont en fait interstratifiés dans les volcaniques.

Au Sud, on observe une faible déformation des formations volcano-détritiques, avec des coulées verticales et des structures volcaniques conservées. Ces unités forment un conglomérat polygénique et hétérométrique en discordance angulaire.

On distingue deux types de conglomérats :

- L'unité Assendjef présente un conglomérat interstratifié.
- Un conglomérat dissocié d'une unité molassique (Série de l'Issouagh).

Le territoire est divisé en quatre unités, du nord au sud :

- Une unité terrigène à amphibolites (oued In Lefsaouène).
- Une région de terre riche en métatabasaltes (oued Immedeghdaghène).
- L'oued Assendjef est une unité volcano-détritique.
- Une unité molassique (Issouagh).

III.2.5. L'unité d'immedeghdaghène

a) Conteneur lithologique :

Situé au sud, l'unité d'In Lefsaouène est couverte par une unité principalement terrigène qui comprend des assises de pélites très épaisses (allant de 500 à 1000 mètres), des schistes gréseux, de rares niveaux de marbres (1 à 3 mètres d'épaisseur) et de nombreux éléments volcaniques basiques dissimulés dans ces terrains. Plus du tiers nord du bassin de l'Aghefsa (zone de l'oued Immedeghdaghène) est occupé par cette unité.

b) Caractéristiques pétrographiques : cette unité est composée de :

- **Les schistes ardoisiers** : vert clair, gris-bleu à noir. La stratification originelle est marquée par des lits centimétriques. Des fragments de minéraux forment une matrice argileuse (80 à 90 %) très fine, composée de séricite, de chlorite et de quartz, donnant une schistosité régulière oblique sur la stratification. Selon (*Foucault et Raoult, 1988*), ces dépôts proviendront des argiles silteuses anciennes.
- **Les schistes gréseux et les micaschistes à muscovite** : sont de texture feuilletée, et riches en quartz (60-70%) et muscovite, et de petites quantités de biotite.
- **Les micaschistes à biotite, grenat et staurotide** : sont de couleur vert olive, elles contiennent du quartz, des feldspaths altérés, et micas (muscovite, biotite, chlorite) ± staurotide et des grenats.
- **Les marbres** : ils sont saccharoïdes, généralement de faible épaisseur (2 à 5 m), présentent un rubanement visible.

III.2.6. L'unité molassique de l'Issouagh

a. Contenu lithologique :

L'unité molassique est bien développée au Sud, dans l'Adrar Issouagh, et affleure partiellement plus au Nord-Ouest, près de l'Oued Afara Héouhine. Elle repose en discordance angulaire sur les séries précédentes. Cette unité est faiblement déformée dans le Sud, avec un basculement vers le Nord-Ouest, tandis que près de l'Oued Afara Héouhine, elle est affectée par des plis subméridiens. Dans l'Adrar Issouagh, la discordance est marquée par des conglomérats polygéniques faiblement déformés et des brèches volcaniques à pendage subhorizontal, reposant sur des roches volcaniques à pendage subvertical.

Cette unité molassique comprend des conglomérats polygéniques, des grès lithiques à stratification entrecroisée, et des brèches volcaniques épaisses (centaines de mètres), interstratifiées avec les conglomérats. Les brèches présentent des éléments anguleux de roches volcaniques dans une matrice vert clair. L'épaisseur totale de cette unité est d'environ 1 km dans l'Issouagh.

b. Caractéristiques pétrographiques :

- **Les conglomérats** : contiennent de nombreux fragments variés (60-80 %), allant de 2 mm à 50 cm, avec des formes arrondies ou anguleuses, et sont principalement composés de rhyolites rouges, de granites roses à rouges, et de rares roches basiques. Le ciment est composé de séricite, quartz et microcristaux de feldspaths altérés.
- **Les grès lithiques** : Associés aux conglomérats, ils forment des niveaux interstratifiés, souvent stratifiés obliquement, de couleur mauve. Ils sont constitués de fragments fins de roches volcaniques basiques, avec des phénocristaux de plagioclases, du quartz détritique et une faible quantité de matrice argileuse (5-10 %). Ils présentent des transitions vers les grauwackes, où la matrice est plus abondante (40-60 %).

III.2.7. Région de l'oued Tin TARABINE

A. Contenu lithologique :

La vallée de l'Oued Tin Tarabine, est caractérisée par des gneiss proches de ceux de l'Oua Helledjène, avec des gradients de gneiss granitiques et dioritiques sur de vastes étendus. Avec des gneiss rouges feldspathiques, interstratifiées dans cet ensemble.

De nombreux niveaux d'amphibolites métriques s'étendent sur des kilomètres, en particulier dans le Nord. On y trouve également de petits bancs de quartzites massifs et quelques lentilles de marbres saccharoïdes.

B. Caractéristiques pétrographiques

Les granites à biotite \pm hornblende les gneiss, contiennent du zircon, l'allanite, le sphène et le grenat comme minéraux accessoires.

- **Les terrains récents :**

Les dépôts les plus récents sont des dépôts gréseux qui forment des plateaux élevés au sud de la région, attribués à l'Ordovicien (*Beuf et al, 1968 ; Beuf et al, 1971*). Selon (*Giorod 1971*), les épanchements basaltiques constituent les plateaux résiduels dans l'extrême Nord de la région étudiée et font partie de l'immense massif volcanique de l'Atakor, qui a connu un âge miocène à quaternaire récent.

- ✓ De récents dépôts alluvionnaires et des glaciaires de pentes parfois épais (de plusieurs dizaines de mètres).
- ✓ Dans le Sud-Est du territoire étudié, on trouve de nombreux dépôts éoliens qui forment des cordons dunaires sur plus de 20 km, ce qui rend leur passage difficile en véhicule.

C. Métamorphisme

L'histoire métamorphique complexe de cette région est liée aux cycles éburnéen et panafricain, ayant affectés le Hoggar (**Fig.9**). La région est subdivisée en trois domaines structuraux et lithologiques : l'Oua Helledjène, l'Aghefsa et l'oued Tin Tarabine.

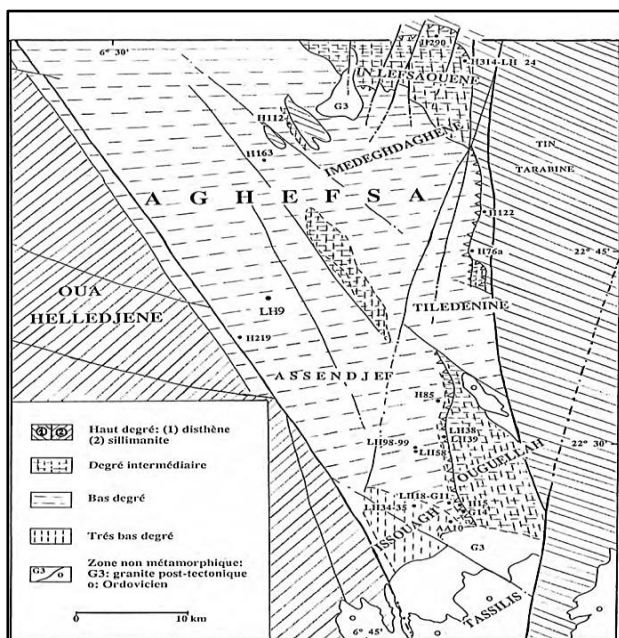


Figure 9: carte schématique des domaines structuraux de la carte de l'Aghefsa

D. Le domaine de l'Oua Héliedjène :

Dans le domaine de l'Oua Héliedjène, à l'exception des lentilles de faciès granulite, conservées et attribuées à l'Eburnéen, on retrouve essentiellement la sillimanite et la cordiérite. Le disthène représentant des reliques d'une phase panafricaine précoce ou même du cycle éburnéen.

Une mobilisation significative est observée avec les migmatites.

Dans cette zone, ainsi que plus au Nord dans la région de l'Aleksod (*Sautter, 1986*), le faciès écolgite est un signe de fonctionnement de charriages crustaux profonds.

E. Le domaine de l'Aghefsa :

Le métamorphisme de bas degré est observé dans une grande partie de l'Aghefsa au Sud (Issouagh-immedeghdaghène) et un gradient thermique local très rapide dans la partie Nord en relation spatiale avec les plutons syntectoniques. La présence sporadique du staurotide, du grenat et du biotite dans les faciès grésopélitiques et de la hornblende dans les faciès metabasiques est caractéristique de ce gradient local. Dans l'extrême Nord, des paragenèses à grenat, biotite et muscovite sont systématiquement observées. L'Aghefsa présenterait donc un métamorphisme de type basse pression à intermédiaire.

F. Le domaine de Tin TARABINE :

Le métamorphisme de pression intermédiaire à haute est marqué par la présence du disthène et grenat. Tout comme dans l'Oua Héliedjène, de nombreux gneiss migmatitiques dans le Sud-Est de la zone de Tin Tarabine, ainsi que des lentilles d'éclogites montrent des conditions de métamorphisme de type HP pression intermédiaire à haute et à haute température dans cette zone, tout comme dans le Serkout et les régions proches de l'Aleksod et de l'Egéré (*Bertrand : 1974, Latouche, 1978*).

III.3. Magmatisme

III.3.1. Magmatisme de l'Oua Héliedjène

Le magmatisme de la région de l'Oua Héliedjène (*Notice Tahifet 2016*), lié avec les ensembles gneissiques et méta-sédimentaires.

III.3.2. Magmatisme ancien

Il est uniquement présent dans les gneiss du socle et se manifeste par des orthogneiss granitiques et dioritiques, avec des bancs d'amphibolites ortho-boudinés, et des lentilles

plurikilométriques de gabbro-diorites au Sud, de la région de l'oued Temagessine.

III.3.3. Magmatisme pré-tectonique panafricain

Associé aux ensembles gneissiques et méta-sédimentaires, il se traduit par des massifs lenticulaires basiques (gabbro-diorites) à ultrabasiques (amphibolites, pyroxénites), comme ceux des Oueds Tamekendout et Matreris au Nord. Ces formations montrent une déformation tectonique marquée, par une foliation parallèle à celle des roches environnantes.

- ✓ **Magmatisme syntectonique** : représente environ la moitié des affleurements rocheux de la région. Il inclut des plutons de gabbro-diorites associés à des granites et le batholite granitique d'Azrou N'Fad, couvrant plus de 1000 km². D'origine anatectique et contient des enclaves basiques aplaties parallèlement à la foliation tectonique. Il présente des similitudes avec le batholite d'Anfeg. Tamanrasset présente aussi des indices de mise en place syntectonique.
- ✓ **Magmatisme tardi à post-tectonique** : Il est caractérisé par un réseau dense de filons acides et basiques traversant le batholite d'Azrou N'Fad. Le pluton complexe de l'Oued Temagessine, avec sa forme circulaire et l'absence de déformation notable, est considéré comme post-tectonique et pourrait appartenir au groupe des Taourirt.
- ✓ **Magmatisme récent** : Ce magmatisme effusif d'âge Cénozoïque se manifeste par des épanchements basaltiques formant des plateaux résiduels non déformés. Il est lié au complexe volcanique tertiaire de l'Atakor, situé plus au Nord.

III.3.4. Magmatisme de l'Aghefsa

Plusieurs ensembles magmatiques de l'Aghefsa sont liés à des événements tectoniques (*Briedj 1993*) :

- ✓ Le magmatisme donnant des séries volcaniques (basaltes à rhyolites) qui sont associées aux dépôts sédimentaires.
- ✓ Le magmatisme formant des granitoïdes précoces en plutons.
- ✓ Un magmatisme synchrone qui se traduit par des massifs lenticulaires de gabbros, tonalites et granites.
- ✓ Le magmatisme explosif lié à la période de la série molassique.
- ✓ Les dernières manifestations ignées du cycle Panafricain, telles que les granites et les filons de monzonites et de rhyolites, sont regroupés dans le magmatisme tardif à post-tectonique de type Taourirt.

III.4. Le volcanisme précoce de l'Aghefsa

Ce sont des volcanites liées aux diverses unités litho-stratigraphiques de la région d'Aghefsa. L'unité volcano-détritique au Sud se caractérise par un volcanisme bimodal, avec des formes basiques et acides bien développées.

III.4.1. Le plutonisme de l'Aghefsa

En dehors des petites intrusions de leucogranites peralumineux situées à l'extrême Nord de la zone, la majeure partie du plutonisme de l'Aghefsa présente un caractère fortement alcalin, le distinguant du magmatisme orogénique classique.

Le plutonisme basique est limité à des intrusions de type gabbro-dioritique, associées au magmatisme syntectonique. Parmi les granitoïdes, deux grands groupes se distinguent sur le plan chimique :

- ✓ Les granites sub-alcalins, regroupant une diversité de roches allant des syénogranites aux leuco-monzogranites. Ces roches, largement majoritaires dans le plutonisme précoce, et également dans le magmatisme post-tectonique.
- ✓ Les granites syntectoniques et des filons de rhyolites post-tectoniques, alcalins. Avec parfois la présence locale de fluorine.

III.4.2. Tectonique

Des événements tectoniques sont liés à l'orogénèse panafricaine (800 à 600 millions d'années). Causant la structuration de ces domaines, ont été caractérisés par des épisodes de tectonique tangentielle, de décrochements ductiles et fragiles, ainsi que par des phases de déformation plurikilométriques. (*Briedj, 2002 et 1993*).

III.4.3. Oua Héliedjène

La région Oua Héliedjène a été affectée par trois principaux événements tectoniques liés à l'orogénèse panafricaine,

Un premier événement caractérisé par une tectonique tangentielle profonde à l'origine de plis isoclinaux sub-latitudinaux de grande amplitude (plurikilométrique) et de nappes crustales profondes (éclogites ; cf schéma structural). Cette tectonique tangentielle a été datée à 615 ± 10 Ma (*Bertrand et al, 1986*).

Un deuxième événement marqué par des décrochements majeurs senestres et de direction N 330° en conditions ductiles accompagnés de plis (droits et ouverts) en échelons subméridiens

et d'échelle kilométrique ;

Un troisième évènement matérialisé par des décrochements subméridiens, dextres en conditions fragiles.

- ✓ **L'Aghefsa** : Dans ce domaine, il existe également trois évènements tectoniques majeurs similaires :
- ✓ **D1A** : une tectonique tangentielle qui se caractérise par une schistosité croissante vers le Nord et un écaillage à diverses échelles grâce à des cisaillements à vergence nord.
- ✓ **D2A** : des décrochements senestres (N 330°) déforment ces structures précoces dans des conditions ductiles.
- ✓ **D3A** : décrochement subméridiens, dextres, qui marquent la limite de blocs losangiques. Un âge Rb/Sr ($RT = 583 \pm 3$ Ma) obtenu sur des rhyolites **pré-tectoniques** du Sud de l'Aghefsa laisse clairement entendre que ces évènements ont eu lieu pendant l'âge panafricain.

L'évolution tectonique de ces deux domaines est donc très similaire, et sans doute aussi celle du domaine de Tin Tarabine, qui a été peu étudié. Cependant, la phase tangentielle précoce subméridienne est bien définie et correspond parfaitement à celle de l'Aghefsa grâce à un contact tectonique important (nappe de charriage).

III.4.4. Minéralisation

La feuille Tahifet, présente une richesse minérale remarquable, marquée par une diversité de minéralisations liées à divers processus magmatiques, hydrothermaux et métamorphiques. Ces minéralisations se manifestent sous diverses formes. Selon leur importance économique, elles sont classées comme suit :

- ✓ Gisements et indices : premières occurrences minérales.
- ✓ Points minéralisés (PM) : concentrations localisées de minéraux d'intérêt.
- ✓ Anomalies géochimiques (AG) : zones identifiées dans les analyses chimiques montrant une teneur anormale en éléments métalliques.
- ✓ Anomalies minéralogiques (AM) : occurrences de minéraux indicateurs spécifiques de minéralisations.

En fonction des éléments chimiques, les minéralisations sont subdivisées en cinq catégories principales :

- ✓ Minéralisations aurifères (Métaux nobles).
- ✓ Métaux rares, terres rares et éléments radioactifs.
- ✓ Minéralisations à platinoïdes.

- ✓ Polymétaux (Cu, Pb, Zn).
- ✓ Autres éléments cibles.

III.5. Type Minéralisations

III.5.1. Minéralisations métalliques

Or (Au) :

L'or se présente principalement sous forme native (métal pur) dans les veines de quartz hydrothermal. Ces veines se développent le long de fractures et failles dans les roches plutoniques (granites) et métamorphiques (gneiss et schistes).

L'or peut également être disséminé dans les quartzites ou piégé au sein de matrices siliceuses. Son origine est souvent attribuée à des circulations de fluides hydrothermaux riches en silice et en métaux nobles.

Cuivre (Cu) :

- **Chalcopyrite (CuFeS_2)** : Principal minéral primaire de cuivre, la chalcopyrite se forme dans des systèmes hydrothermaux à haute température. Elle est souvent associée à des minéralisations polymétalliques et se trouve dans des roches volcaniques, métamorphiques ou plutoniques.
- **Malachite ($\text{Cu}_2\text{CO}_3(\text{OH})_2$) et Azurite ($\text{Cu}_3(\text{CO}_3)_2(\text{OH})_2$)** : Ces minéraux secondaires résultent de l'altération de la chalcopyrite en surface, souvent sous l'effet de conditions oxydantes. La malachite présente une teinte verte caractéristique, tandis que l'azurite est d'un bleu profond.

Plomb (Pb) :

Galène (PbS) : Minéral primaire du plomb, la galène se cristallise sous forme de cubes brillants de couleur gris métallique. Elle est fréquemment associée à des veines hydrothermales et peut coexister avec la sphalérite (ZnS) et l'argentite (Ag_2S).

Zinc (Zn) :

- **Sphalérite (ZnS)** : Minéral majeur du zinc, la sphalérite apparaît souvent sous forme de cristaux bruns à noirs. Elle est généralement associée à des systèmes hydrothermaux polymétalliques.
- **Argent (Ag)** : Argentite (Ag_2S) : Principal sulfure d'argent, l'argentite est souvent présente en association avec la galène et la chalcopyrite. L'argent peut également se retrouver sous forme native dans certaines zones riches en métaux précieux.

III.5.2. Minéraux Ferreux

- **Magnétite (Fe_3O_4)** : Ce minéral magnétique de fer est présent dans des formations plutoniques (gabbros, diorites) et métamorphiques. La magnétite se forme souvent dans des contextes où les fluides magmatiques sont riches en fer.
- **Hématite (Fe_2O_3)** : L'hématite, d'une teinte rougeâtre à noire, est typique des environnements oxydants. Elle peut apparaître suite à l'altération de la magnétite ou dans des dépôts hydrothermaux.

III.5.3. Minéraux Silicatés

- **Quartz** : Minéral omniprésent dans la région, le quartz forme les veines hydrothermales où l'or est souvent piégé. Il constitue également la matrice principale des quartzites et des veines siliceuses associées aux intrusions granitiques.
- **Feldspaths** : Ces minéraux présents des granites et des roches magmatiques de la région.
- Ils peuvent subir une altération en kaolinite dans les zones météorisées.
- **Mica (biotite et muscovite)** : présents sous forme de feuillets brillants. La biotite (mica noir) est typique des roches magmatiques, tandis que la muscovite (mica blanc) est fréquente dans les formations métamorphiques.

III.5.4. Minéraux d'Altération et d'Argiles

- **Kaolinite** : Issue de l'altération des feldspaths sous conditions acides, la kaolinite est commune dans les zones altérées des formations granitiques.
- **Illite** : Ce minéral argileux se forme souvent dans les zones d'altération hydrothermale et peut accompagner des minéralisations métalliques.

III.5.5. Minéraux Carbonatés

- **Calcite** : La calcite cristallise fréquemment dans des veines de carbonates associées à des systèmes hydrothermaux. Elle peut jouer un rôle dans le piégeage de certains métaux en solution.
- **Dolomite** : Minéral typique des formations carbonatées métamorphisées, la dolomite est également observée dans des zones hydrothermales
- Autres minéraux :
- **Tourmaline** : Présente dans les formations granitiques et métamorphiques, parfois porteuse d'éléments métallique

- **Apatite** : Minéral phosphaté commun dans les roches magmatiques et métamorphiques.

III.6. Conclusion

En conclusion la feuille Tahifet se distingue par une grande diversité de minéralisations métalliques et non métalliques. Ces minéralisations, contrôlées par des événements magmatiques et hydrothermaux dans les formations plutoniques et métamorphiques, présentent un potentiel économique significatif pour les métaux précieux (or, argent), les Polymétaux (cuivre, plomb, zinc) ainsi que pour des éléments stratégiques comme les terres rares et les platinoïdes.

Chapitre IV
Systeme d'information géographique

IV.1. Introduction

Les Systèmes d'Information Géographique (SIG) combinent la cartographie et l'analyse de données spatiales pour produire des outils d'aide à la décision dans divers domaines : aménagement du territoire, santé, environnement, géologie, etc. Initiés par R.F. Tomlinson en 1963, les SIG intègrent aujourd'hui plusieurs disciplines comme l'informatique, la télédétection et la géographie.

IV.2. Définition d'un SIG

Un SIG est un système permettant de saisir, stocker, manipuler, analyser et visualiser des données géographiques liées à des emplacements spécifiques sur la surface terrestre. Il facilite l'analyse spatiale et la prise de décision dans des domaines variés, (Fig.10) comme l'environnement, l'urbanisme ou les ressources naturelles (Lakhoua ; 2007)

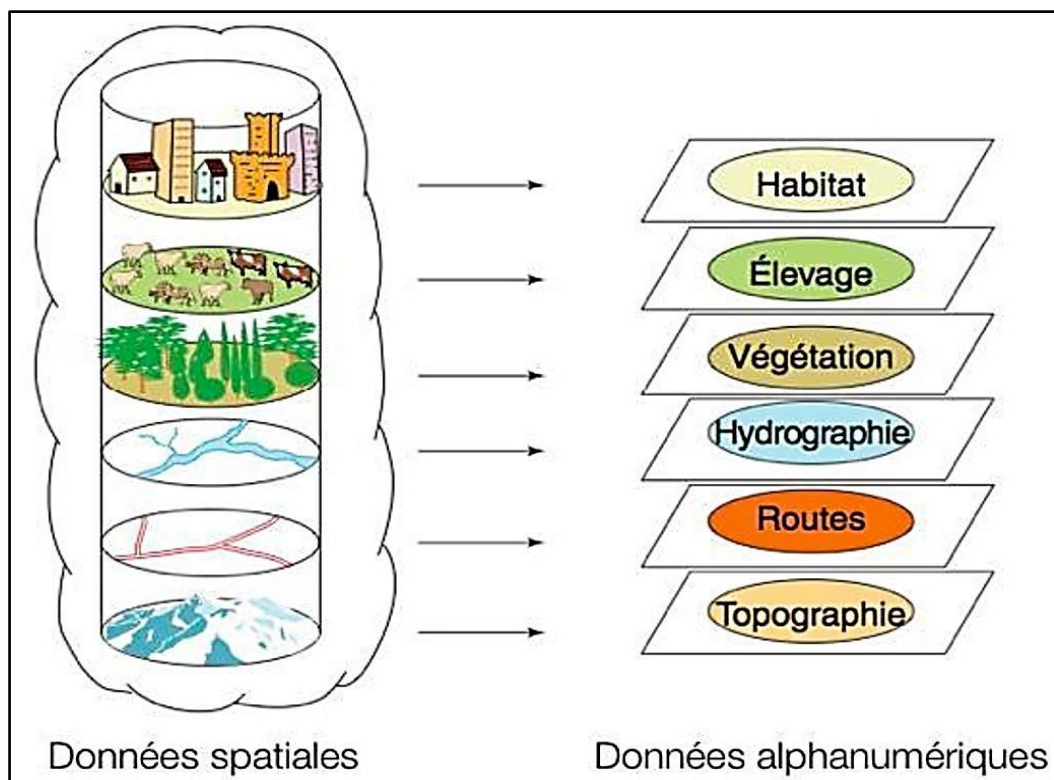


Figure 10: Données alphanumériques et données spatiales.

IV.3. Les composants d'un SIG

Les composants d'un Système d'Information Géographique (SIG) sont généralement divisés en cinq catégories principales (**Fig.11**) :

Données : spatiales (vecteurs ou rasters) et attributaires. (*Longley, 2005*).

Matériel (Hardware) : comprend ordinateurs, GPS, scanners. (*Burrough, 1998*).

Logiciel (Software) : Les logiciels SIG sont des programmes informatiques permettant la gestion, l'analyse et la visualisation des données géospatiales comme : ArcGIS, QGIS, MapInfo. *De Mers, M. N. (2008)*.

Méthodes : Il s'agit des techniques, processus et algorithmes utilisés pour analyser les données géospatiales. Cela comprend la gestion des données, la modélisation spatiale, et l'utilisation de procédures analytiques pour prendre des décisions éclairées. (*Heywood 2011*).

Personnel : Ce sont les utilisateurs et experts qui manipulent les systèmes SIG. Ils jouent un rôle clé en collectant des données, en configurant les systèmes et en interprétant les résultats des analyses géospatiales. (Tomlinson 2007).



Figure 11: les composants d'un SIG.

IV.4. Représentation des données dans un SIG

IV.4.1. Mode Raster

Le mode raster représente l'espace sous forme d'une grille de pixels, chacun portant une valeur liée à une donnée géographique (ex. : altitude, température). Il est idéal pour les données continues comme les images satellites ou les modèles d'élévation. Bien qu'il facilite l'analyse, sa précision dépend de la taille des pixels : plus ils sont petits, plus la représentation est détaillée. (Fig.12).

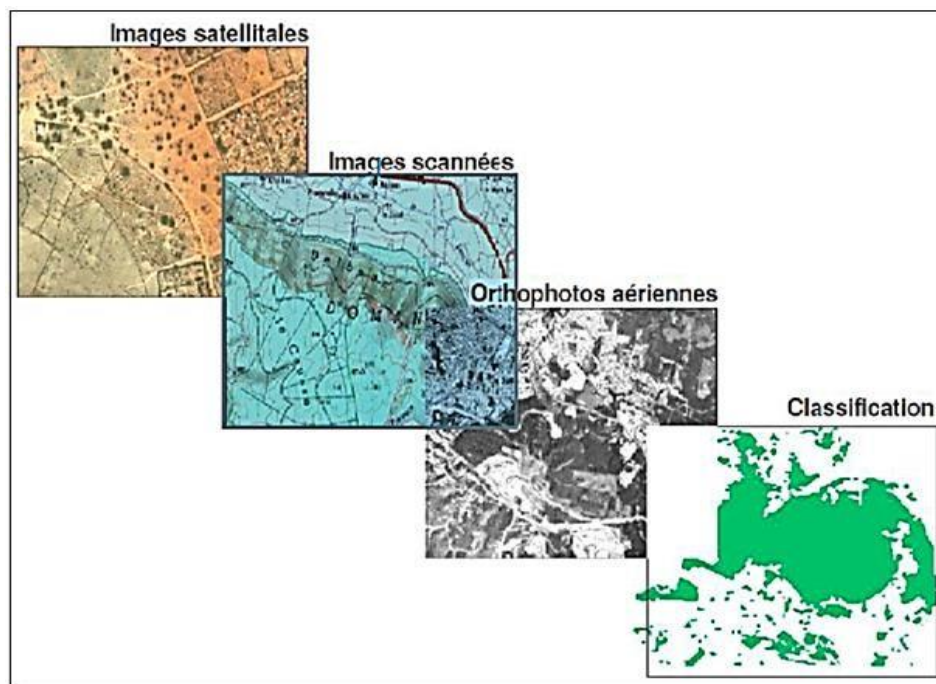


Figure 12: exemple de quelques données raster (BONNET M, 2012).

IV.4.2. Mode Vecteur

Dans un Système d'Information Géographique (SIG), le mode vecteur est utilisé pour représenter les données géographiques en utilisant des formes géométriques précises. (Fig.13) Les points : utilisés pour représenter des entités discrètes comme des bâtiments, des arbres ou des bornes géographiques. Chaque point est défini par des coordonnées (x ; y) dans un système de référence.

- Les lignes : représentent des éléments linéaires tels que des routes, des rivières ou des chemins. Elles sont définies par une série de points connectés.
- Les polygones : servent à délimiter des zones fermées comme des forêts, des lacs ou des parcelles agricoles. Ils sont constitués d'une série de lignes connectées formant une surface fermée.

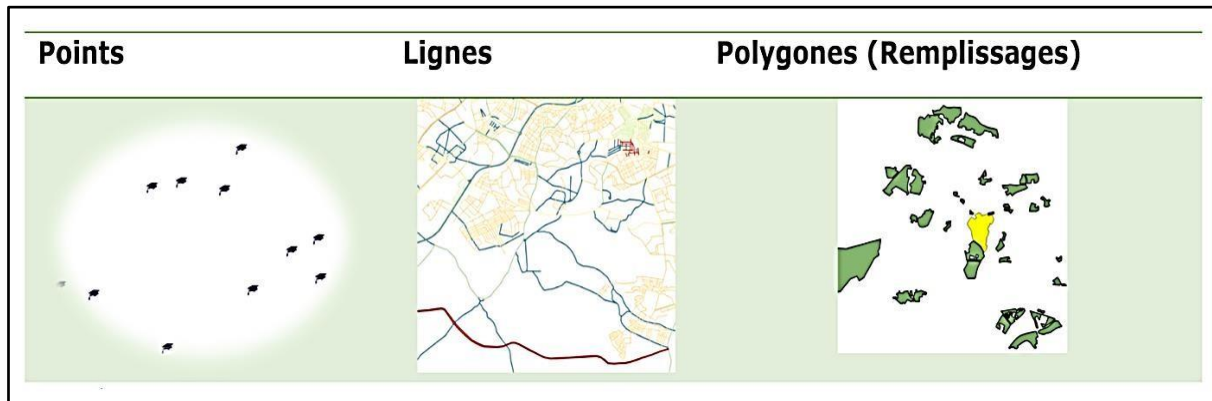


Figure 13: types de données vectorielles.

IV.5. Comparaison des modes vecteurs et rasters

Les données vectorielles et raster sont deux types fondamentaux utilisés dans les Systèmes d'Information Géographique (SIG). Chacun possède des caractéristiques distinctes qui influencent leur utilisation selon les besoins spécifiques des projets. Certaines applications peuvent même faire appel aux deux modes (tableau 1).

Tableau 1: les avantages et inconvénient de mode Raster et Vecteur.

MODE	AVANTAGES	INCOVÉNIENTS
RASTER	Nécessitent peu de traitement informatique. Offrant une représentation fidèle de la réalité. Analyse spatiale aisée. Combinaison de couches aisée.	Exigent une grande mémoire de stockage. Moins précis. Faibles qualités d'affichage et d'impression. Moins adapté à la représentation.
VECTEUR	Nécessitent peu de mémoire de stockages. Lisible et précis. Bonne qualité d'affichage. Position et forme des éléments très précise.	Risque de recouvrement des données. Structure de données complexe. Croisement de couches complexe.

IV.6. SIG et Géologie

IV.6.1. Construction du SIG géologique :

La construction d'un SIG géologique nécessite un modèle de données capable de répondre à plusieurs exigences importantes, telles que :

Représenter de manière précise et exhaustive le contenu de la carte géologique.

Associer les divers éléments de la carte en fonction de leur signification géologique à travers des thèmes appropriés.

Offrir un outil permettant des analyses optimisées.

IV.6.2. Architecture du modèle spatial :

Le modèle spatial géologique repose sur une base de données multicouche, où l'information est organisée par thèmes homogènes (polygones, lignes, points). Les couches superposées permettent de représenter en pseudo-3D les éléments géologiques comme le substratum rocheux, les formations superficielles, les structures tectoniques ou encore les forages, offrant ainsi une représentation complète et structurée de la carte géologique.

IV.6.3. Méthode de construction d'un SIG :

La création d'une carte géologique dans un SIG repose sur la numérisation des lignes délimitant les unités de terrain, appelées *objets élémentaires*. Ces lignes, appartenant à différents thèmes géologiques, servent à construire des polygones ou à représenter des éléments linéaires. Une fois les fonctions géologiques attribuées, une opération topologique est réalisée pour générer les surfaces. Ce processus itératif garantit la cohérence sémantique et spatiale du modèle SIG.

IV.7 .Les domaines d'application du SIG :

- Urbanisme et aménagement du territoire : les SIG facilitent la planification urbaine et l'optimisation des infrastructures en visualisant l'impact des projets de développement.
- Environnement et conservation : ils aident à gérer les ressources naturelles, suivre la biodiversité et planifier la conservation environnementale.
- Gestion des catastrophes et réponses d'urgence : les SIG essentiels pour modéliser les risques naturels et coordonner les secours lors de catastrophes.
- Agriculture de précision : ils permettent la cartographie des sols, l'analyse de la productivité des cultures et la gestion des intrants agricoles.

- Transport et logistique : ils optimisent les itinéraires et gèrent les réseaux logistiques.
- Géomarketing : ils permettent d'analyser le marché et d'optimiser les campagnes marketing en fonction de la localisation.
- Géologie : améliorent la compréhension des processus géologiques et optimisent la gestion des ressources naturelles.
- Tourisme et loisirs : ils favorisent la création des cartes interactives pour le tourisme et gérer les ressources récréatives.

IV.7.1. Les avantages d'un SIG

- Analyse et visualisation spatiale avancée.
- Aide à la décision.
- Gestion efficace des ressources.
- Réduction des délais et des coûts.
- Communication claire via des cartes.
- Suivi en temps réel et précision accrue.

IV.7.2. SIG sous ArcGis

IV.7.2.1. Définition du logiciel ArcGis

ArcGIS est un système complet qui permet de collecter, organiser, gérer, analyser, communiquer et diffuser des informations géographiques. En tant que principale plateforme de développement et d'utilisation des systèmes d'informations géographiques (SIG) au monde, ArcGIS est utilisé par des personnes du monde entier pour mettre les connaissances géographiques au service du gouvernement, des entreprises, de la science, de l'éducation et des médias. ArcGIS permet la publication des informations géographiques afin qu'elles puissent être accessibles et utilisables par quiconque.

IV.7.2.2. Présentation du logiciel ArcGis 10

ArcGIS 10 est une version clé de la suite de logiciels d'information géographique développée par Esri. Elle comprend trois applications principales : ArcMap, ArcCatalog et ArcToolbox, chacune ayant des fonctionnalités spécifiques qui contribuent à la puissance et à la flexibilité du logiciel.

ArcMap : est le logiciel central de la plateforme ArcGIS, conçu pour créer, visualiser et analyser des cartes. Il offre certaines fonctionnalités :

- Création de cartes interactives : personnalise l'apparence des données géographiques et crée des présentations visuelles percutantes.
- Analyse de données approfondie : utilise des outils d'analyse spatiale avancée pour comprendre les relations entre différentes couches de données et identifier des tendances.
- Partage facile des résultats : diffuse les cartes et analyse dans différents formats pour les partager avec un public plus large.

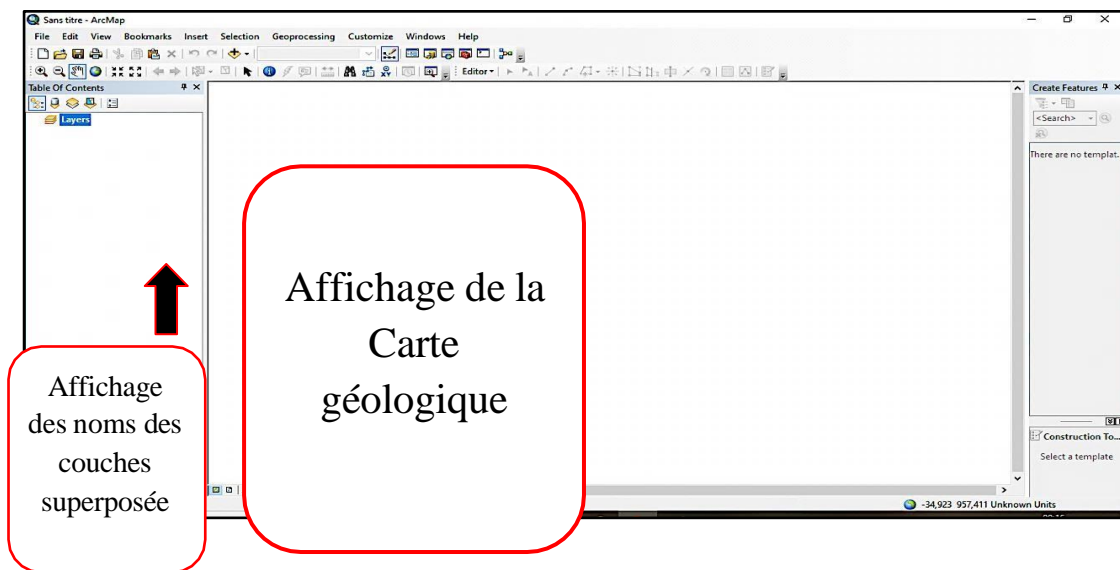


Figure 14: Description d'une fenêtre ArcMap.

ArcCatalog : est un outil essentiel pour la gestion des données géographiques, il simplifie l'organisation et l'utilisation des informations spatiales grâce à des fonctionnalités clés. Il permet l'exploration et l'organisation des données, offrant aux utilisateurs la possibilité de parcourir, gérer et structurer leurs jeux de données SIG de manière efficace, à l'image d'un gestionnaire de fichiers. De plus, ArcCatalog offre la possibilité de prévisualiser les données, ce qui permet de consulter les propriétés des éléments géographiques avant de les intégrer dans ArcMap.

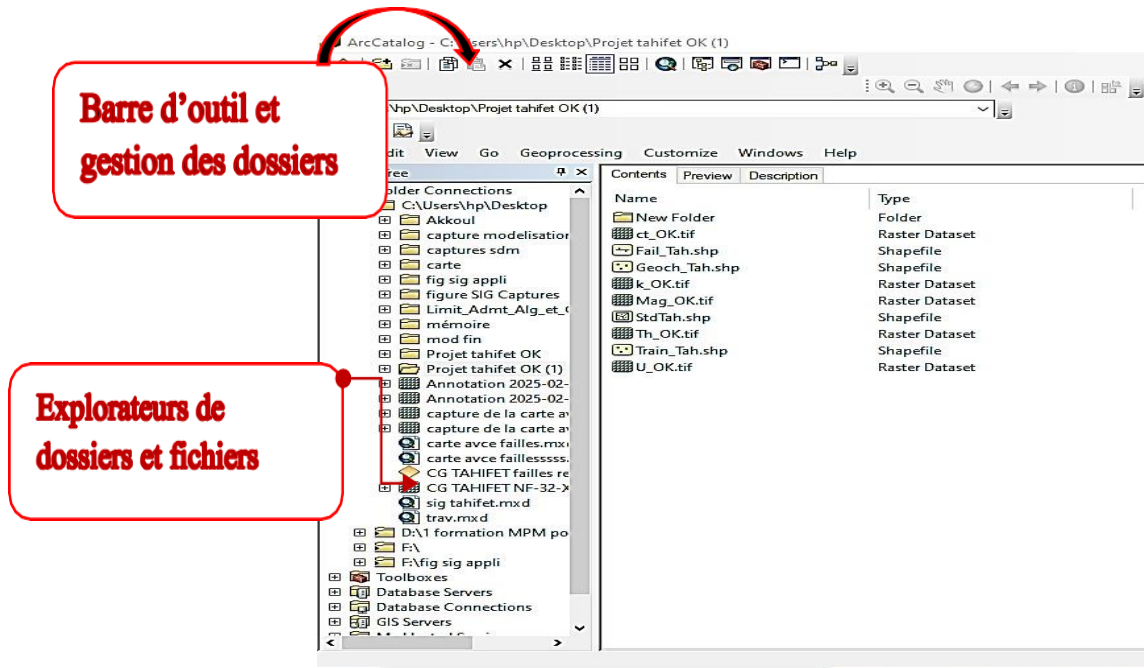


Figure 15: Fenêtre ArcCatalog.

ArcToolbox : ArcToolbox est une boîte à outils intégrée dans les SIG, dédiée au géotraitement et à l'analyse spatiale. Elle propose une large gamme d'outils permettant d'effectuer des analyses complexes (comme les calculs de distances ou la création de zones tampons) et d'automatiser les traitements. Elle facilite ainsi l'exploration des relations spatiales entre les données, tout en optimisant le temps et l'efficacité des analyses.

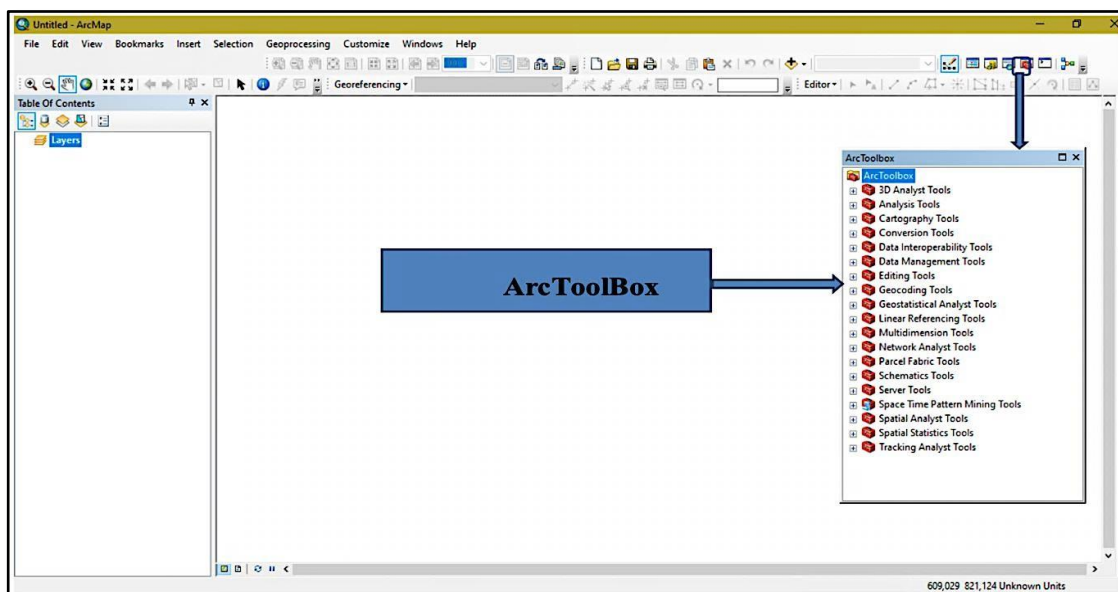


Figure 16: Interface Arc Toolbox.

IV.8. SIG appliqué sur la région d'étude

La cartographie géologique SIG réalisée dans cette étude a été effectuée à l'aide du logiciel ArcGIS, en raison de ses capacités avancées en traitement et analyse de données spatiales. On l'a utilisé afin d'atteindre notre objectif principal, qui est la cartographie SIG de la carte de la région de Tahifet.

IV.8.1. Étapes suivies pour le traitement et vectorisation des cartes

IV.8.1.1. Rappels théoriques

- Système de coordonnées de Référence :

Il existe deux types de systèmes de coordonnées de référence : les systèmes de coordonnées géographiques et les systèmes de coordonnées projetées.

- Systèmes de coordonnées géographiques :

Un système de coordonnées géographiques (GCS) permet de localiser des points sur la Terre à l'aide de coordonnées sphériques, basées sur une unité angulaire, un méridien de référence (comme Greenwich) et un datum géodésique (ex. : WGS 84, largement utilisé dans le GPS).

Cependant, pour représenter la surface terrestre sur un plan, une **projection cartographique** est nécessaire. Dans ce travail, le système **UTM (Universal Transverse Mercator)** a été utilisé. Il convertit les coordonnées sphériques en coordonnées planes, avec des axes X orientés vers l'est et Y vers le nord, offrant une précision adaptée aux zones locales.

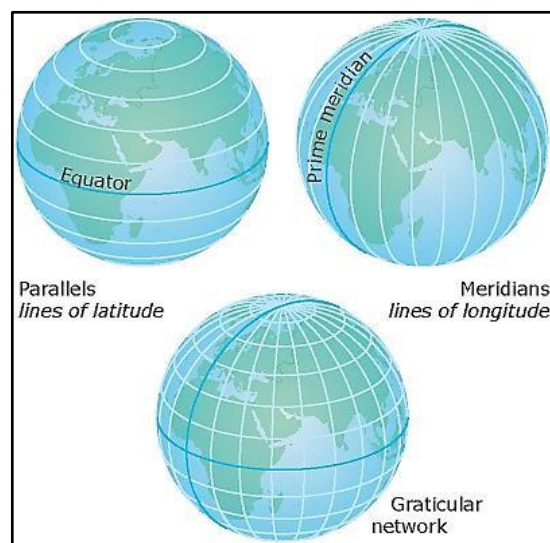


Figure 17: Les parallèles et les méridiens constituant un graticule.

On appelle **datum** le référentiel géodésique qui permet de définir un **système de coordonnées géographiques**. Il repose sur trois éléments fondamentaux :

- **Une unité angulaire** : généralement le degré, utilisée pour exprimer la latitude et la longitude.
- **Un méridien de référence** : souvent le méridien de Greenwich, servant de point d'origine pour la longitude.
- **Un ellipsoïde** : qui est un modèle mathématique représentant la forme de la Terre de manière plus réaliste qu'une sphère parfaite.

Les coordonnées d'une même position sur la Terre peuvent varier selon le datum utilisé. La figure ci-dessous illustre le globe terrestre avec les coordonnées de longitude et de latitude projetées, ce qui permet de voir comment les coordonnées géographiques sont réparties.

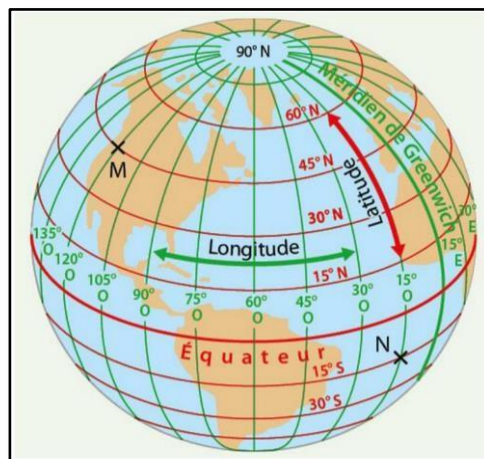


Figure 18: Globe terrestre avec les valeurs de longitude et de latitude.

- Système de coordonnées projetées :

Un système de coordonnées projetées permet de représenter la surface courbe de la Terre sur un plan en deux dimensions à l'aide de coordonnées linéaires (souvent en mètres). Contrairement au système géographique basé sur des coordonnées angulaires, il facilite les mesures précises de distances, surfaces et angles. Il repose sur un système géographique auquel est appliquée une **projection cartographique**.

Parmi les projections les plus utilisées, on trouve la projection UTM (Universal Transverse Mercator), qui divise le globe en 60 fuseaux de 6° de longitude chacun, de part et d'autre de l'équateur. L'Algérie, par exemple, se trouve principalement dans la zone 31N, mais elle est également couverte en partie par les zones 29, 30 et 32.

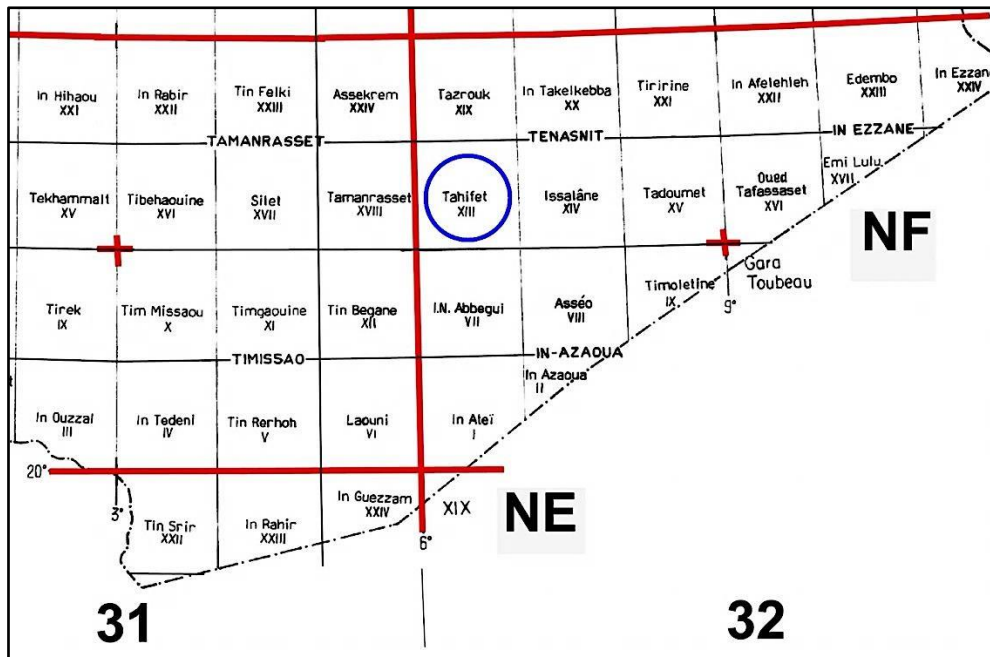


Figure 19: Fuseaux horaires du sud de l'Algérie.

IV.8.1.2. Géo-référencement

Le géo référencement consiste à attribuer des coordonnées géographiques réelles à une image raster (comme une carte scannée), afin de l'intégrer dans un SIG. Appelé aussi « calage » dans ArcGIS, ce processus est essentiel pour exploiter correctement les données spatiales. L'utilisation d'un système de projection unique est recommandée pour éviter les déformations et garantir la précision des analyses spatiales.

Dans le cadre de notre travail, nous avons utilisé le système de projection UTM Nord Sahara, zone 32, adapté à la région étudiée.

Voici la procédure à suivre pour géo référencé une carte en utilisant ArcGIS 10 :

- ✓ Le début consiste à lancer l'application ArcCatalog.
- ✓ Pour accéder aux données raster dans ArcGIS, il faut d'abord établir une connexion au dossier contenant les fichiers. Dans ArcCatalog, cela se fait via le menu **"Fichier" > "Connexion à un dossier"**, puis en sélectionnant le dossier souhaité (par exemple, celui des cartes raster). Une fois connecté, le dossier apparaît dans l'arborescence, et un clic gauche permet d'afficher son contenu dans la fenêtre de droite.

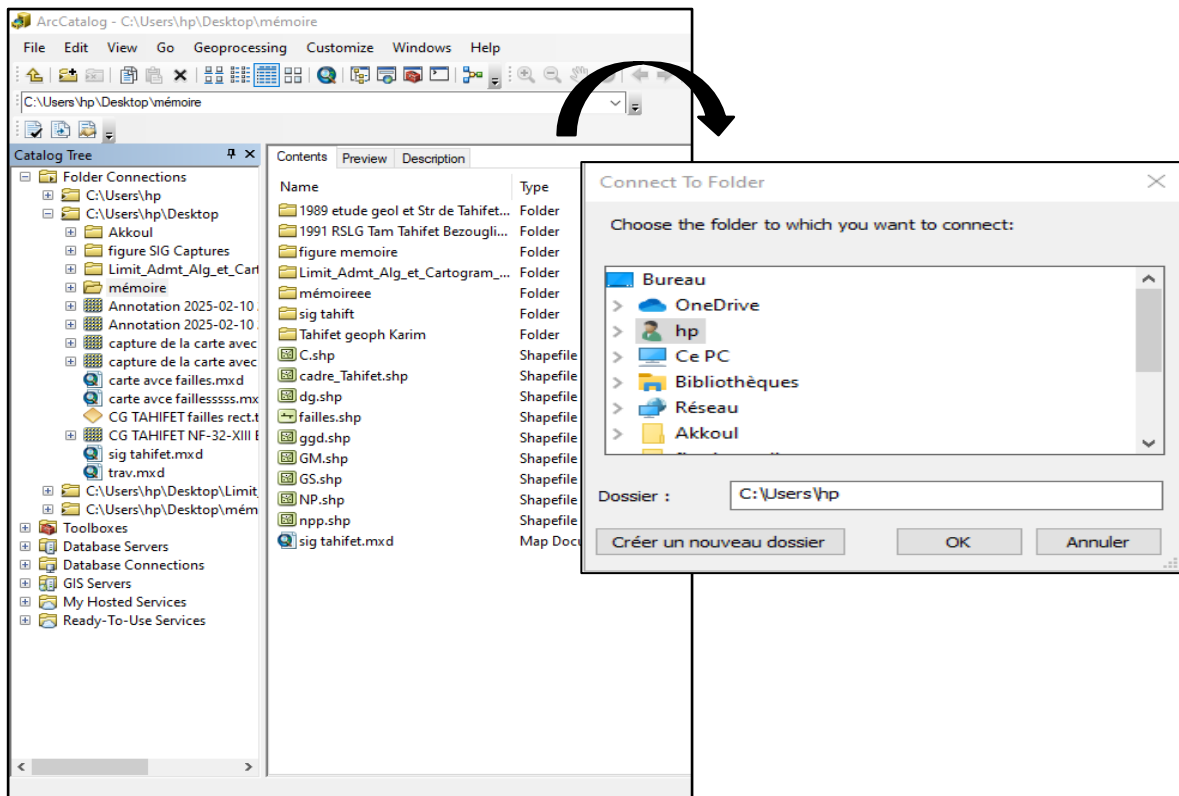


Figure 20: Connecter ArcCatalog à un dossier spécifique.

Pour définir le système de coordonnées d'une carte raster dans ArcCatalog, commencez par sélectionner le fichier raster en question. Ensuite, effectuez un clic droit sur ce fichier et choisissez l'option "Propriétés" dans le menu contextuel. Une fois la fenêtre des propriétés ouverte, naviguez jusqu'à l'onglet "Références spatiales" et cliquez sur le bouton "Modifier". Dans la nouvelle fenêtre qui apparaît, suivez le chemin suivant : "Sélection → Références spatiales → Systèmes de coordonnées projetées → UTM → Africa".

Vous pourrez alors choisir le système de coordonnées adapté à votre carte, tel que "Nord_Sahara_1959_Zone_32N". Pour finir, validez votre sélection en cliquant sur le bouton "OK".

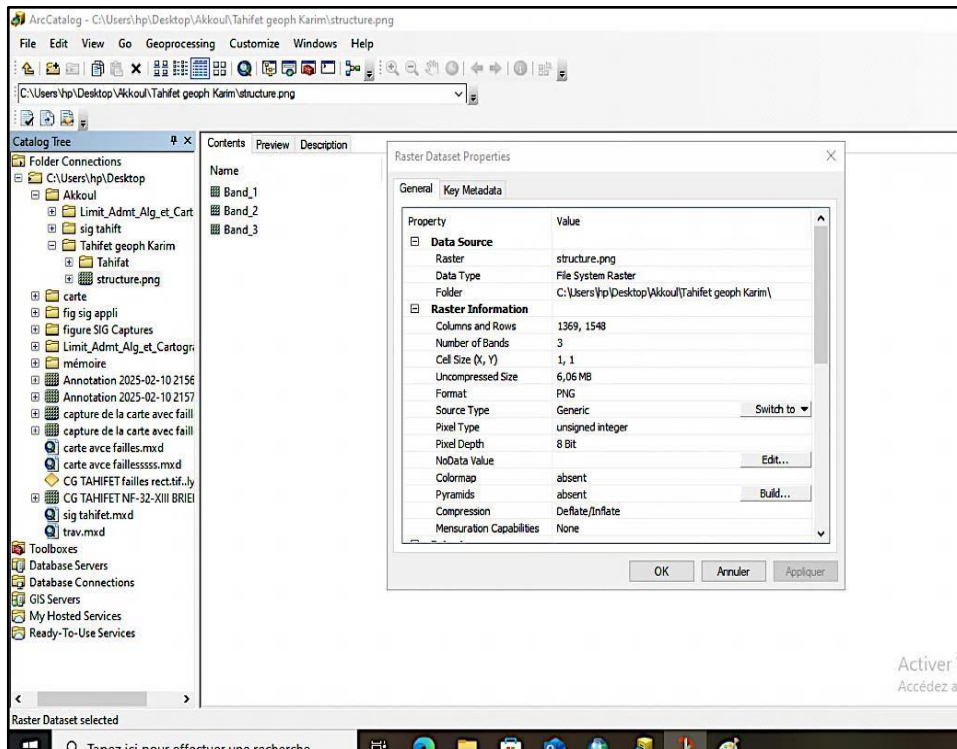


Figure 21: Mise en place d'un système de projection via ArcCatalog.

a. Définir un système de coordonnées commun dans ArcMap :

Pour garantir un bon alignement des données spatiales, il est indispensable d'appliquer le même système de coordonnées à toutes les couches. Après avoir lancé ArcMap, sélectionnez l'option « Carte vierge ». Dans la table des matières, effectuez un clic droit sur « Couches » puis ouvrez « Propriétés ». Dans l'onglet « Système de coordonnées », accédez à : Prédéfini → Système de coordonnées projetées → UTM → Africa. Choisissez ensuite le système approprié à votre zone d'étude, par exemple : Nord Sahara 1959 UTM Zone 32N, validez avec « OK ».

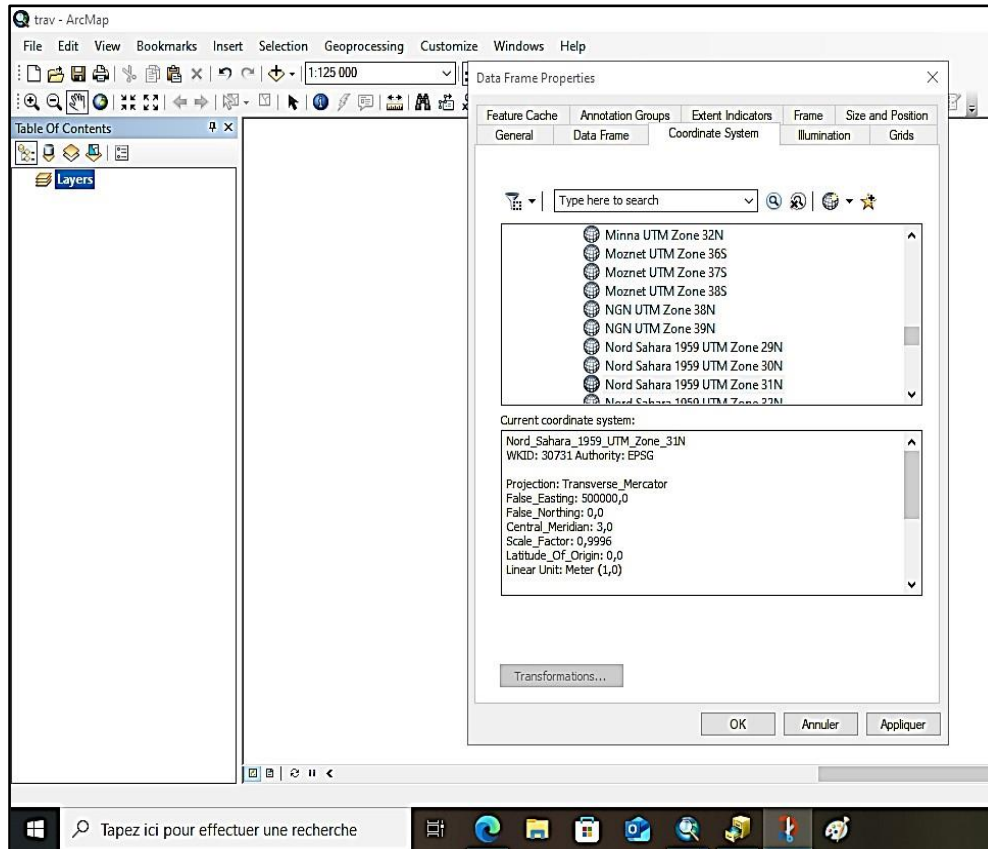


Figure 22: Définition de la référence spatiale dans ArcMap.

b. Intégration de la carte à géoréférencer dans ArcMap à partir d'ArcCatalog :

Pour insérer la carte à caler dans ArcMap, ouvrez ArcCatalog, sélectionnez la carte souhaitée, puis faites-la glisser directement dans la fenêtre d'ArcMap.

Une fois l'image déposée, une boîte de dialogue apparaît, vous invitant à générer des pyramides. Cliquez sur « OK » pour confirmer. La carte sera alors visible dans la table des matières à gauche de l'interface, dans la liste des couches chargées.

La génération de pyramides améliore les performances d'affichage de la carte, surtout lors des zooms et déplacements, en réduisant le temps de chargement.

c. Insertion des points de contrôle pour le géoréférencement :

Cette étape repose sur l'utilisation de la barre d'outils « Géoréférencement » qu'il faut activer via le menu : Personnaliser → Barres d'outils → Géo référencement. Cette fonctionnalité permet de géoréférencer des données Raster dans ArcMap.

La procédure à suivre est la suivante :

- Désactiver l'ajustement automatique dans la barre « Géoréférencement ».
- Cliquer sur « **Ajouter des points** » pour commencer la saisie.
- Renseigner les coordonnées DMS (degrés, minutes, secondes) des quatre points de référence, selon le système de projection d'origine de la carte raster.
- Cliquer ensuite sur « **Visualiser la table des liens** » pour afficher les correspondances entre les points.
- Une fois les points ajoutés, cliquer sur « **Transformation** », activer « **Ajustement automatique** », puis valider en cliquant sur **OK**

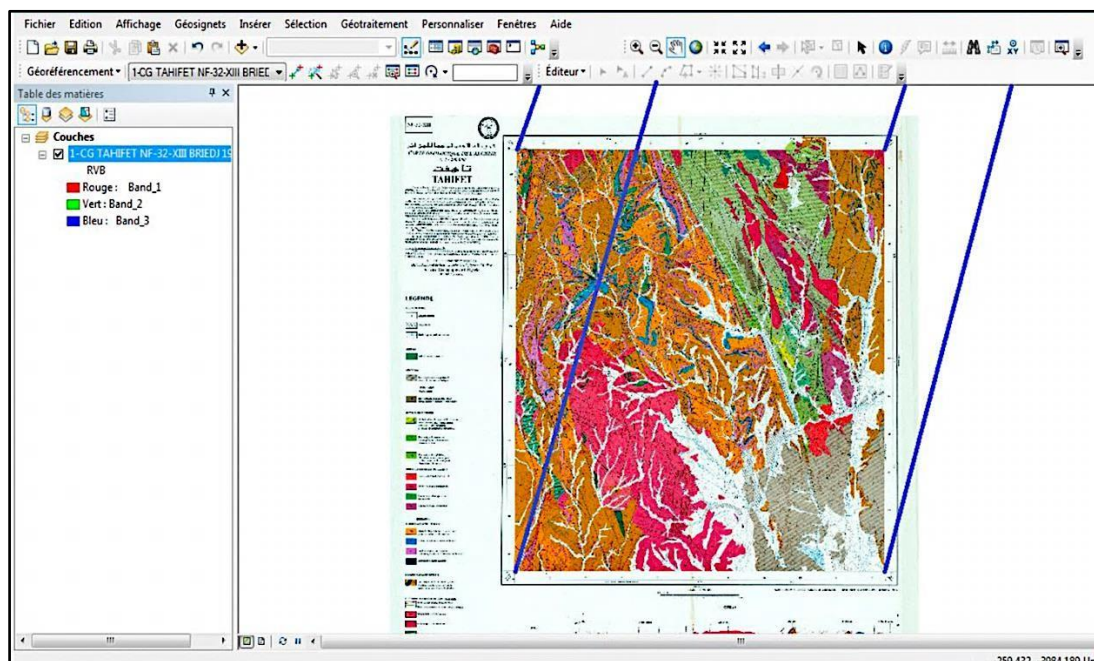


Figure 23: Géo référencement d'une carte dans ArcGIS.

IV.8.1.3. Vectorisation d'une carte

Il convient de ne pas confondre le géo référencement avec la digitalisation, également appelée numérisation. La numérisation consiste à convertir une information provenant d'un support physique (papier, photo, etc.) ou électronique en un format informatique exploitable. En revanche, la vectorisation (ou digitalisation au sens strict en cartographie) correspond à la transformation d'une image raster — où l'information est stockée sous forme de pixels — en un format vecteur, dans lequel les données sont représentées par des entités géométriques telles que des points, lignes ou polygones.

Le choix de la géométrie dépend du type d'objet à vectoriser :

- ✓ Une faille est représentée par une poly ligne (trait).

- ✓ Un affleurement est représenté par un polygone (surface).
- ✓ Une minéralisation est représentée par un point.

La vectorisation suit plusieurs étapes bien définies, que nous détaillerons ci-après :

d. Création d'une couche « fichier de formes » via ArcCatalog:

Avant de créer une nouvelle couche dans un Système d'Information Géographique (SIG), il est essentiel de réfléchir à la modélisation des entités que l'on souhaite y intégrer. En effet, une couche regroupe un ensemble d'objets partageant le même type sémantique (par exemple, toutes les failles ou tous les affleurements), et tous les éléments d'une même couche doivent être du même type géographique, c'est-à-dire point, ligne ou polygone. La création d'un fichier de formes (shapefile) dans ArcGIS se fait via l'interface ArcCatalog. Pour cela, il suffit de faire un clic droit sur un espace vide, puis de sélectionner Nouveau → Fichier de formes (New → Shapefile).

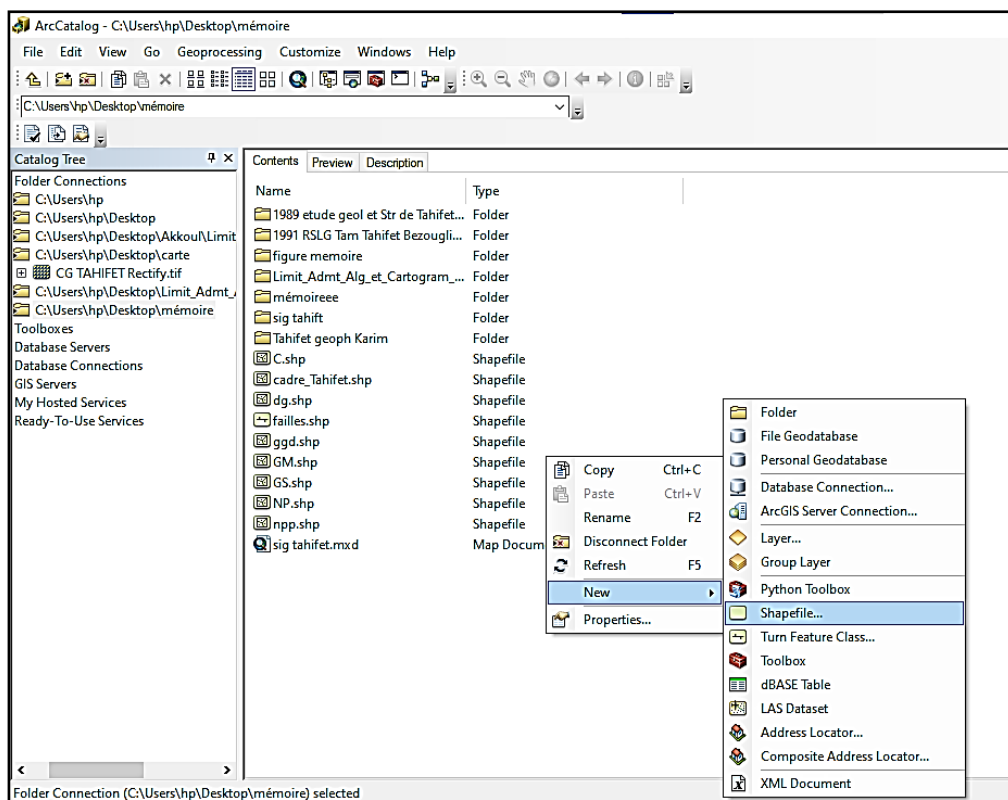


Figure 24: Créer un fichier de formes.

Ensuite, il convient de nommer le fichier de formes à créer, de définir le type de géométrie souhaité (polygone, polyligne ou point), puis de lui attribuer un système de coordonnées. Ce dernier doit impérativement correspondre à celui de la carte utilisée dans ArcMap, afin

d'assurer une parfaite compatibilité et d'éviter tout décalage spatial.

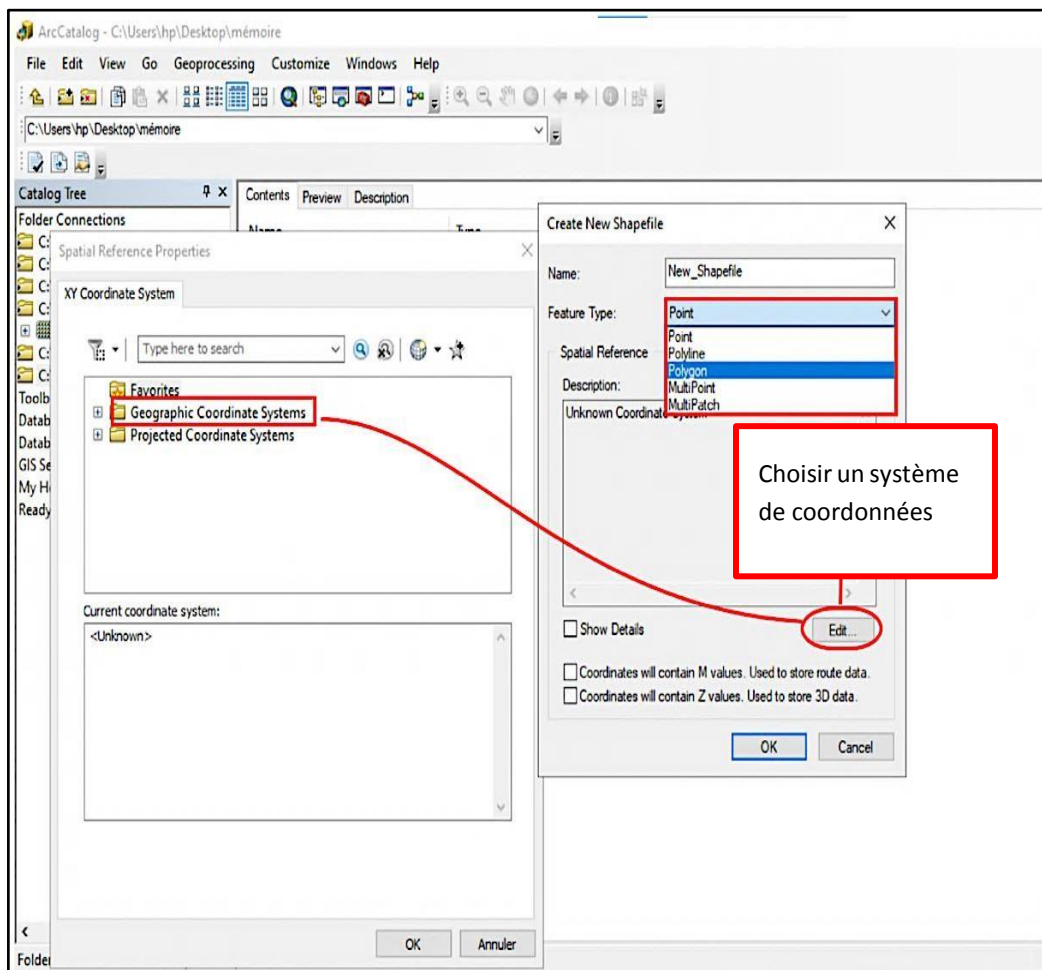


Figure 25: Choix du type d'entités et du système de coordonnées.

Pour conclure, on fait glisser le fichier de formes dans l'interface ArcMap.

e. Entamer la vectorisation dans ArcMap via l'outil Éditeur :

Pour procéder à la vectorisation d'une nouvelle couche (shapefile), il est nécessaire d'activer l'outil « Éditeur ».

Pour l'activer : aller dans le menu Personnaliser → Barres d'outils → cochez « Éditeur »

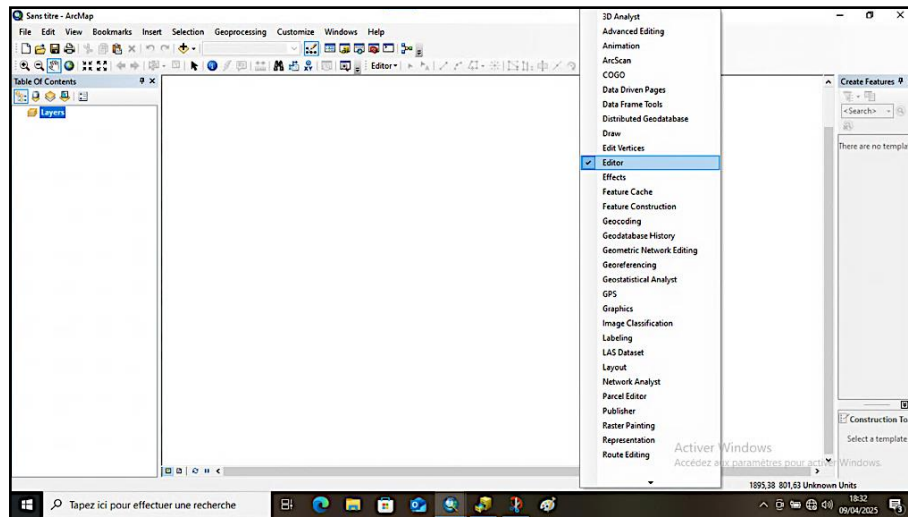


Figure 26: Activer l'outil Éditeur.

Une fois l'outil **Éditeur** activé, on peut modifier la couche, pour ceci il suffit de suivre les étapes suivantes :

Clic gauche sur Éditeur → Ouvrir une session de mise à jour → Choisir la couche à modifier → Activer l'outil « Segment » → vectoriser ensuite l'entité polygonale souhaitée.

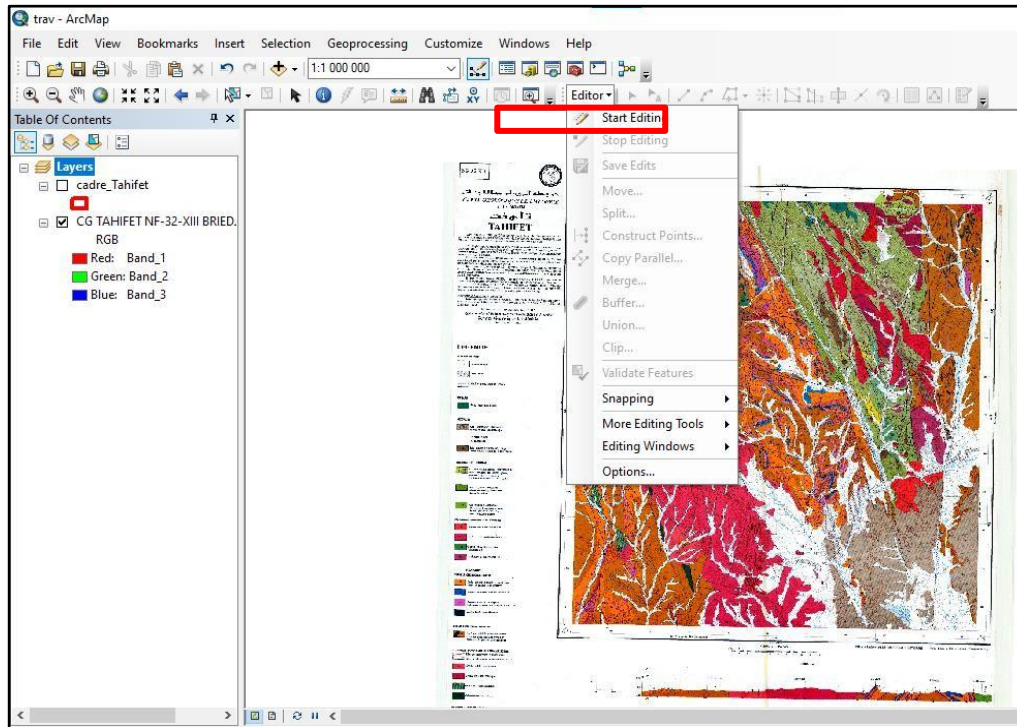


Figure 27 : Ouvrir une nouvelle session de mise à jour.

Pour sauvegarder le travail effectué, il suffit de cliquer sur Éditeur, puis de sélectionner Enregistrer les mises à jour.

Après avoir suivi l'ensemble des étapes précédentes (géoréférencement, vectorisation), nous avons pu générer de façon cohérente les différentes couches d'information, telles que les couches litho-stratigraphiques, magmatiques, tectoniques.

f. Vectorisation « Polygone » :

Les couches ayant une surface sont des zones délimitées de manière complète par des segments de ligne droite, des arcs (circulaires ou elliptiques), ainsi que des courbes de Bézier reliant différents sommets. Elles servent à représenter des entités naturelles ou techniques caractérisées par des surfaces planes fermées.

Pour créer une entité surfacique, il suffit de générer un fichier de formes de type "Polygone".

✓ Litho-stratigraphie :

En appliquant la même méthode à toutes les entités litho-stratigraphiques de la carte de Tahifet, nous avons vectorisé toutes les couches "Polygones" représentant les formations litho-stratigraphiques. Pour débiter la vectorisation des couches litho-stratigraphiques, nous avons commencé par celle de la formation « Quaternaire ».

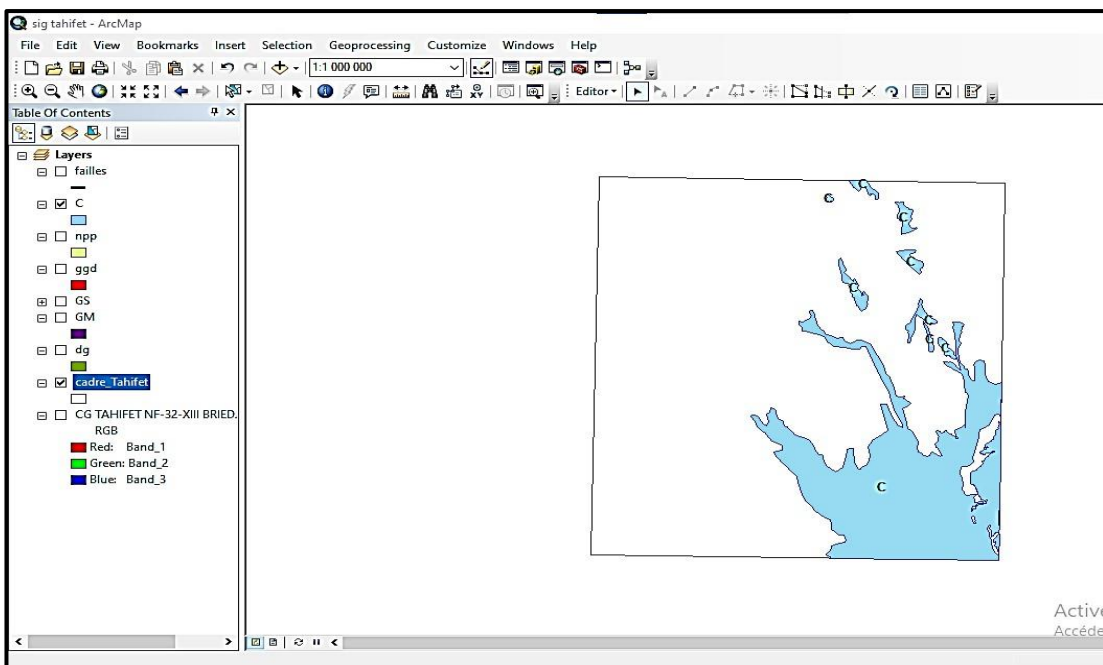


Figure 28: Cas de vectorisation d'une couche géologique quaternaire dans la région

g. Magmatisme :

Pour entamer la vectorisation des couches magmatiques, nous avons suivis le même processus pour celle de la formation magmatique (Fig.29).

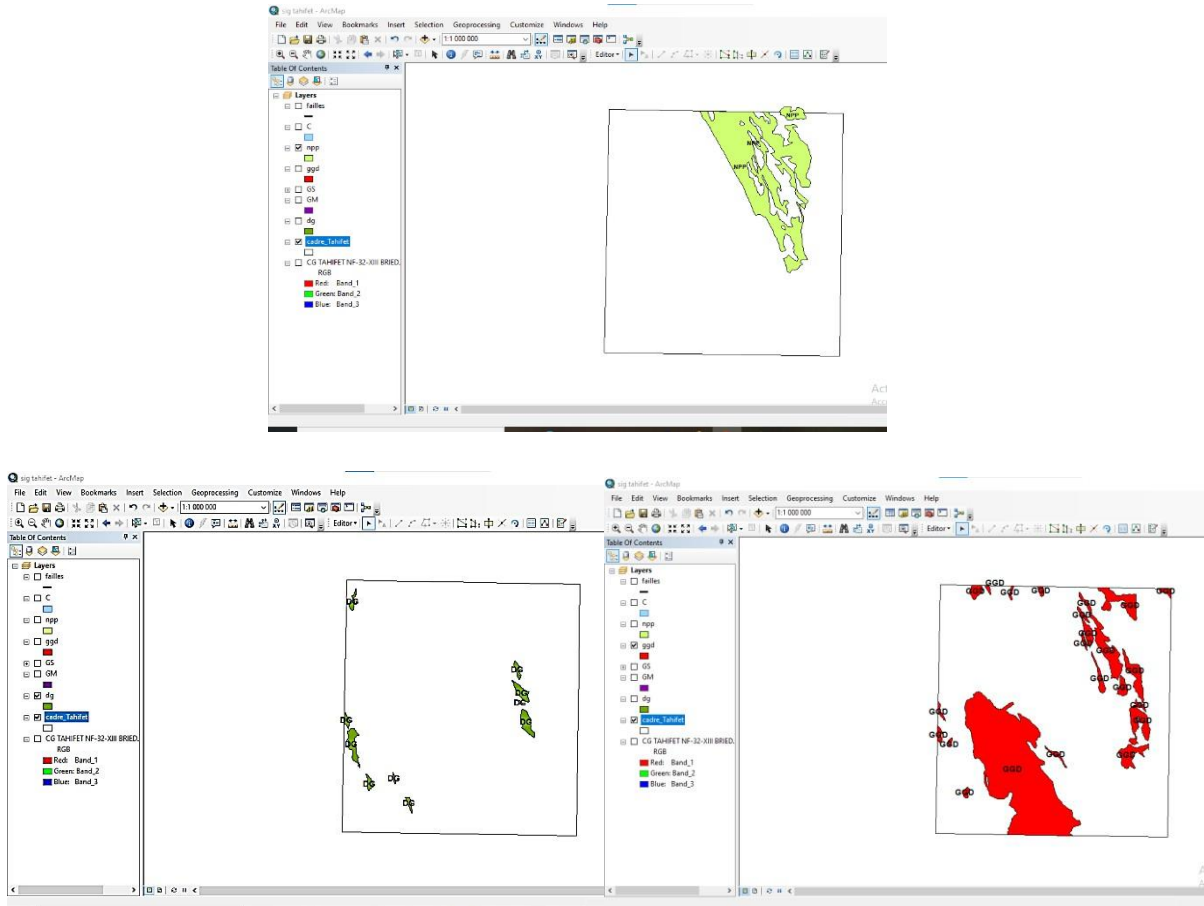


Figure 29: Résultat de la vectorisation des couches magmatique dans la région

h. Métamorphisme :

La vectorisation des zones de métamorphisme de la carte de Tahifet, matérialisées par les formations du Protérozoïque terminal, a été effectuée selon la même méthodologie que celle employée pour les couches magmatiques et litho-stratigraphiques.

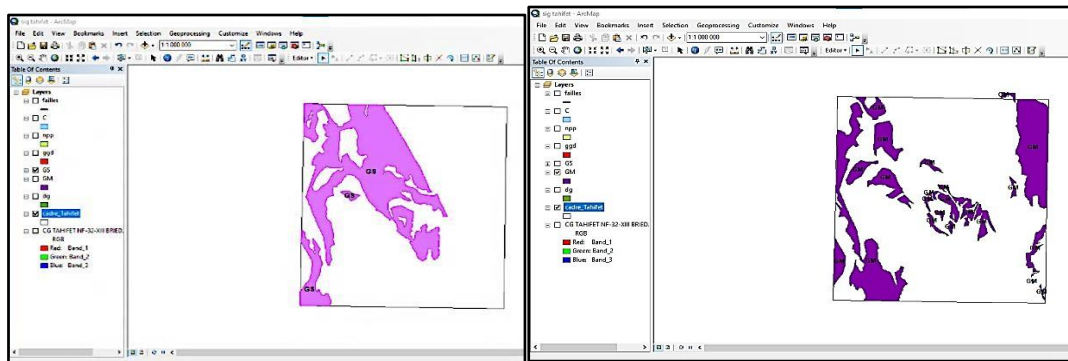


Figure 30: Processus de vectorisation appliqué à une unité métamorphique dans la région de Tahifet sous ArcMap.

i. Vectorisation linéaire « Poly ligne » :

Les polygones, composées de segments de droite, d'arcs circulaires et elliptiques, ainsi que de courbes de Bézier entre leurs points de connexion, permettent de figurer des éléments linéaires et curvilignes caractérisés par une longueur, mais dépourvus de surface.

j. Tectonique :

En appliquant les mêmes étapes que pour la vectorisation surfacique mentionnée auparavant, nous avons vectorisé les structures tectoniques (failles sûr et supposé) de la feuille de Tahifet. Cette opération a consisté à créer un nouveau fichier de formes en choisissant "Polyligne" comme type d'entité.

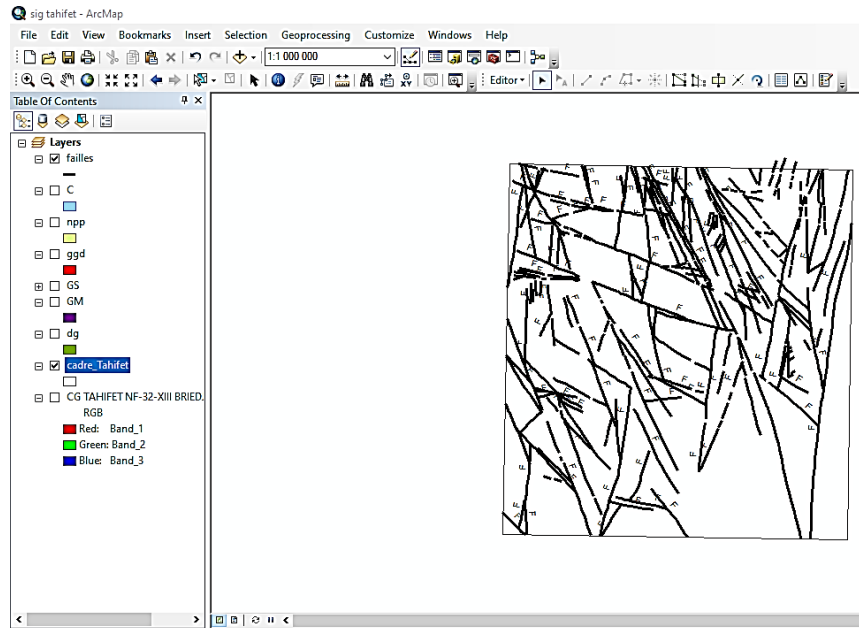


Figure 31: Vectorisation des structures tectoniques linéaires : exemple des failles.

k. Vectorisation ponctuelle (points) :

La vectorisation ponctuelle consiste à représenter des entités par des points localisés selon des coordonnées x , y , z précises sur une carte. Ces entités ponctuelles servent à illustrer des objets ou des données qui ne nécessitent pas l'usage de lignes ou de surfaces pour être interprétés ou stockés. La création d'une couche ponctuelle suit les mêmes étapes que pour une couche polygones ou polygones, à la différence près que le type d'entité choisi est « point ».

✓ **Création d'un fichier Excel :**

Pour ce qui est de la couche minéralisations (Anomalies géochimiques, anomalies minéralogique, indices et gisements), un fichier Excel (**Fig.32**) a été élaboré à partir des données géologiques tirées du catalogue de minéralisation du rapport de recherches systématiques et levé géologique au 1/200000 de Tahifet (EREM ; Bezouglkh 1990) que nous avons transformé par la suite en deux shapfiles : le premier concerne la couche anomalie géochimique utilisée comme évidence prédictive géochimie et le second (indices et gisements) utilisé comme couche points d'entraînements (**figure 33,34**).

Chapitre IV : système d'information géographique

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
815 a.g.	sans N°	22°50'30" 6°02'00"	Tungstène	Auréole de schlich de 4 km2 dans région de gneiss à l'exocontact Sud de granites.	Batée 4/4 4/1	Scheelite Or		traces traces	Kleye- nov 1979
816 a.g.		22°50'00" 6°04'50" éch. 41	Cuivre	Filon quartzeux de direction sublatitudinale, puissant de 3 à 4 m à inclusion de résidus de granites roses.	Marteau 1	Cuivre		0,08	Bézougl lykh Y. et al., 1990
817 p.m.		22°49'05" 6°09'02" éch. 234	Niobium	Zone de failles remplies de filons et filonnets quartzeux, puissants de 10 cm à 2 m, longs de 10 à 300 m, de direction 90-110°.	Marteau 1	Niobium Zircon		0,03 0,2	- //
818 a.g.		22°48'30" 6°12'45" schlich 6	Argent	Analyse spectrale de schlich prélevé dans formations alluvio-proluvionnaires.	Géoch. Batée	Argent Titane		1 g/t >1,0	- //
819 a.g.		22°47'10" 6°14'40" schlich 4	Etain	Analyse spectrale de schlich prélevé dans formations alluvio-proluvionnaires.	Géoch. Batée	Etain Argent		0,001 1 g/t	- //
820 a.g.		22°46'30" 6°13'25" schlich 5 éch. 7	Or	Sablons proluvio-alluvionnaires ainsi que analyse spectrale de schlich de ces sables.	Géoch. Batée	Or Cérium Lanthane		0,06 g/t 0,08 0,08	- //
821 a.g.		22°45'35" 6°09'40" éch. 55	Etain / Niobium	Granites roses, biotitiques à grains fins dans granitoïnes, marbres et quartzites.	Marteau 1	Etain Niobium		0,0015 0,015	

A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K
75	AG	Sn-W	6	23	30	6,3917	22	31	0	22,5167
76	AG	Sn-W	6	27	0	6,4500	22	31	20	22,5222
77	AG	Nb	6	40	0	6,6667	22	44	0	22,7333
78	PM	Au	6	39	50	6,6639	22	42	30	22,7083
79	AG	Au	6	36	30	6,6083	22	41	55	22,6986
80	Indice	Au	6	37	42	6,6283	22	39	45	22,6625
81	AG	Nb	6	39	20	6,6556	22	39	0	22,6500
82	AG	Sn-W	6	39	28	6,6578	22	38	28	22,6411
83	AG	Sn-W	6	40	30	6,6750	22	38	40	22,6444
84	AG	Nb	6	40	55	6,6819	22	38	10	22,6361
85	AG	Nb	6	41	40	6,6944	22	38	0	22,6333
86	PM	Nb	6	41	35	6,6931	22	37	40	22,6278
87	AG	Sn-W	6	44	45	6,7458	22	39	15	22,6542
88	AG	Au	6	38	50	6,6472	22	37	40	22,6278
89	PM	Nb	6	34	20	6,5722	22	36	40	22,6111
90	AG	Nb	6	34	40	6,5778	22	36	0	22,6000
91	PM	Ag	6	41	20	6,6889	22	36	35	22,6097
92	AG	Nb	6	40	0	6,6667	22	36	5	22,6014
93	Indice	Au	6	41	0	6,6833	22	36	6	22,6017
94	AG	Nb	6	41	15	6,6875	22	35	5	22,5847
95	AG	Sn-W	6	44	45	6,7458	22	35	40	22,5944
96	AG	Sn-W	6	44	35	6,7431	22	35	40	22,5944
97	AG	Sn-W	6	31	30	6,5250	22	34	0	22,5667
98	Indice	Au	6	34	30	6,5750	22	33	50	22,5639
99	AG	Au	6	43	0	6,7167	22	30	50	22,5139
100	AG	Sn-W	6	49	50	6,8306	22	44	58	22,7494
101	AG	Sn-W	6	50	5	6,8347	22	43	50	22,7306
102	AG	Sn-W	6	46	0	6,7667	22	44	0	22,7333



Figure 32: transformation du catalogue des minéralisations (EREM ; Bezouglkh 1990) en fichier Excel

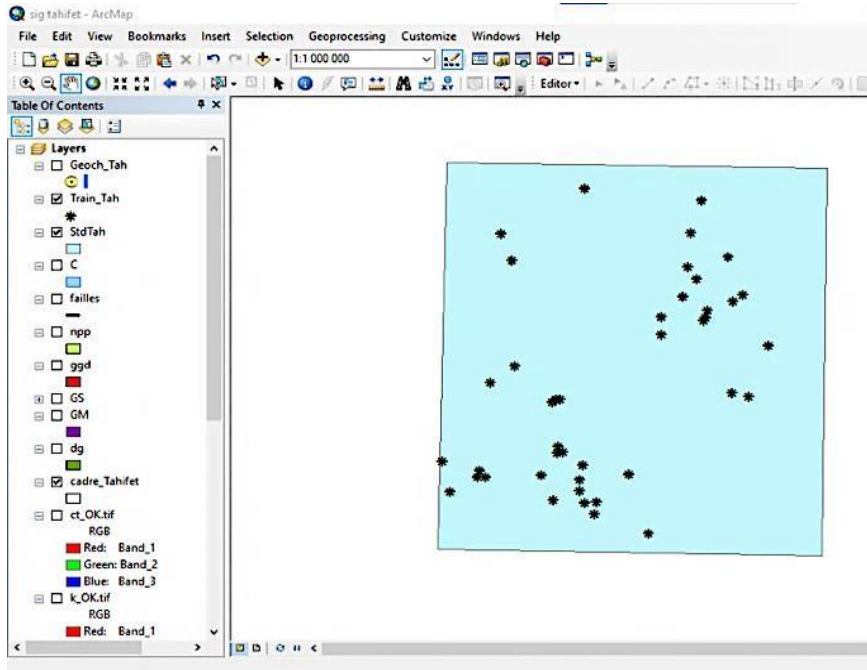


Figure 33: couche ponctuelle d'indices et gisements

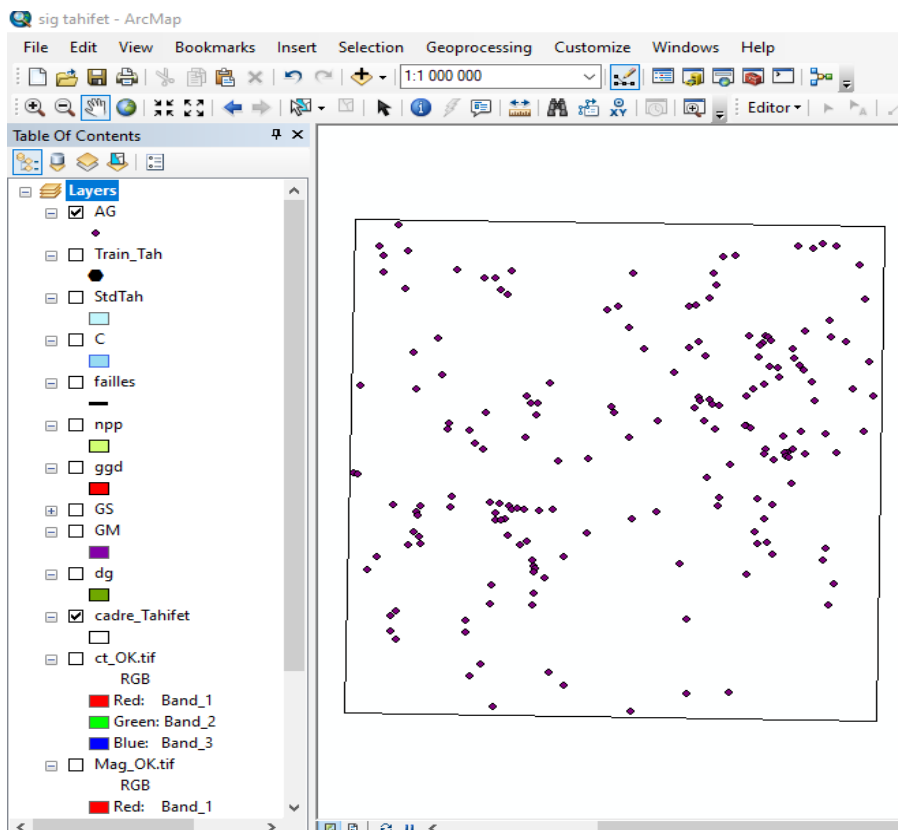


Figure 34: couche ponctuelle d'AG

Le fichier doit être exporté dans ArcGIS au format shapefile, lequel sera reconnu par le logiciel SIG comme une couche vectorielle ponctuelle illustrant les zones de minéralisation, issues d'une carte vectorielle élaborée à partir d'un fond raster publié. Pour effectuer la conversion du fichier Excel en shapefile, les étapes suivantes doivent être suivies : Fichier → Ajouter des données → Ajouter des données XY, sélectionner ensuite le tableau concerné, puis définir le système de coordonnées en choisissant : Systèmes de coordonnées géographiques → Monde → WGS 1984.prj

Ainsi on a obtenu un SIG géologique complet sur la région d'étude (**Fig.35**).

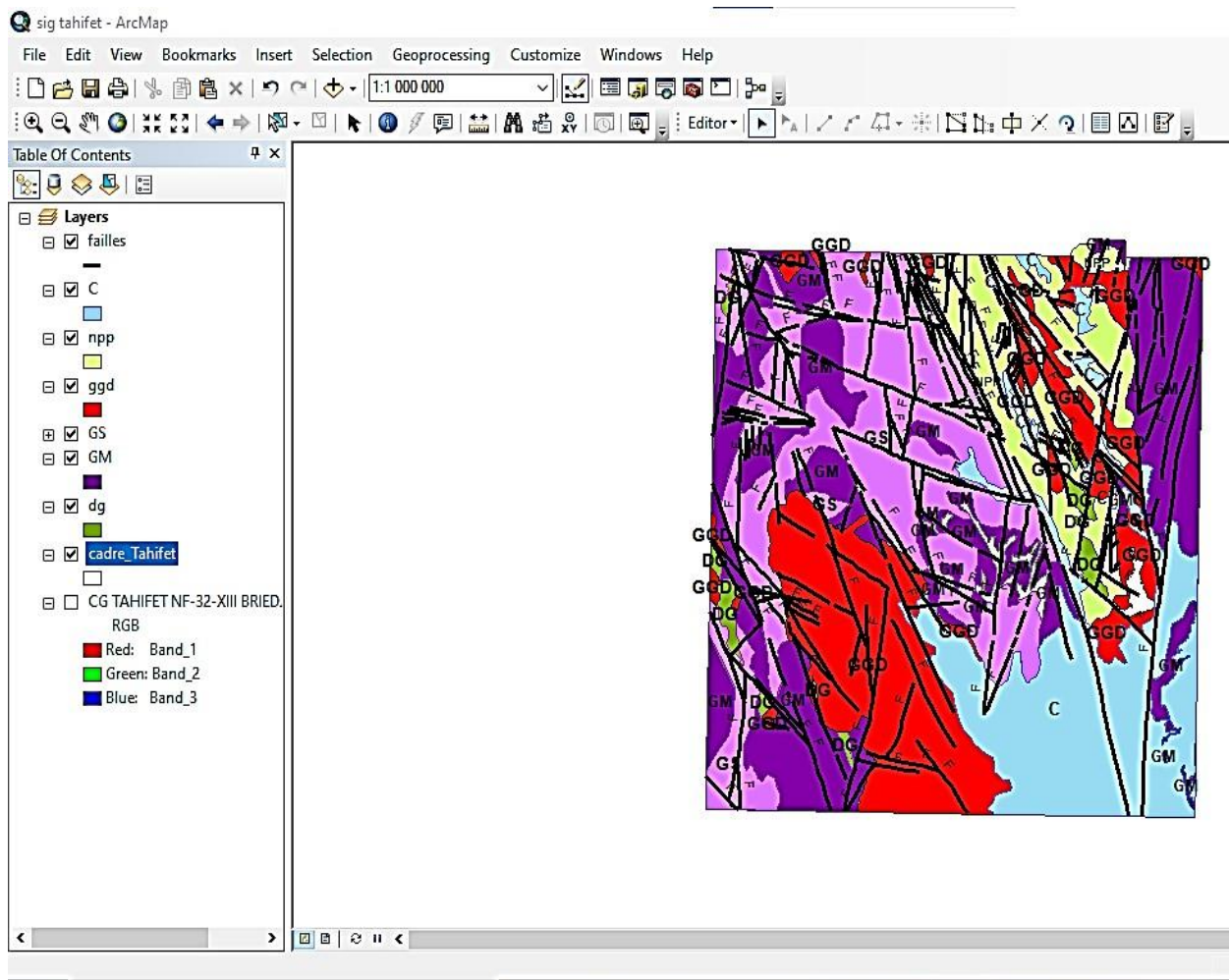


Figure 35: carte géologique vecteur simplifié de Tahifet.

Chapitre V
Modélisation

V.1. Introduction

L'application des méthodes géomatiques à l'exploration minérale nécessite la collecte de diverses données géologiques. La méthode des poids de l'évidence, permet de mesurer l'association spatiale entre des points d'entraînement et les informations géologiques collectées. Elle utilise le théorème de Bayes pour combiner ces cartes par pondération, en tenant compte des probabilités antérieures, une carte finale appelée "carte des probabilités postérieures" est enfin produite. Cette méthode est bien décrite dans les travaux de (Bonham-Carter. 1989, 1994), (Wang et al. 2002) et (Carranza.2009).

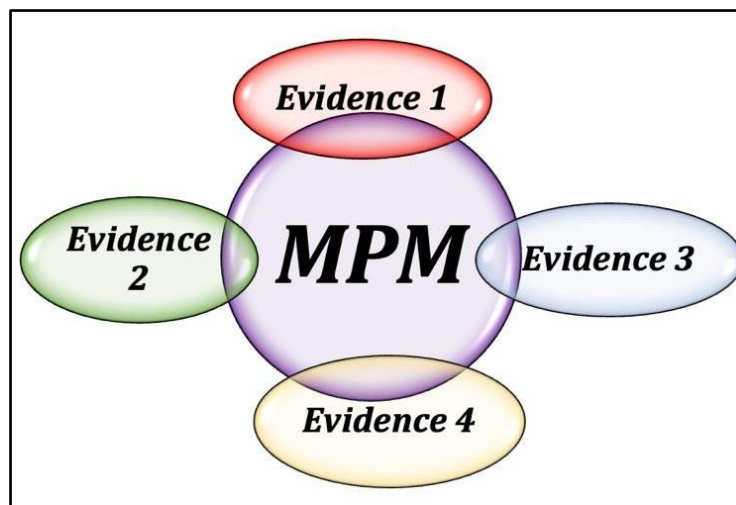


Figure 36 : principe Bayésien de combinaisons prédictives.

Aujourd'hui, la méthode WofE est l'approche statistique la plus utilisée dans l'exploration minérale à cause de son caractère objectif et son application facile grâce à l'ordre de certains logiciels SIG modernes tels que (ArcGIS ; MapInfo) permettant d'exécuter facilement cette modélisation.

V.2. Description de la méthode

La méthode WofE permet d'évaluer l'association spatiale entre des occurrences minérales connues et des évidences prédictives issues de données géoscientifiques (géologie, tectonique, etc.).

Elle repose sur deux types de probabilités :

- ✓ **La probabilité antérieure**, qui reflète la densité des gisements connus dans la région (calculée à partir de la surface totale et du nombre de gisements).
- ✓ **La probabilité postérieure**, obtenue en intégrant toutes les cartes prédictives binaires.

Pour que les calculs soient valides, il faut :

- ✓ Que chaque pixel soit assez petit pour contenir au maximum un seul gisement,
- ✓ Que les cartes prédictives soient conditionnellement indépendantes.

La taille du pixel a un impact direct sur les résultats. À l'échelle 1/200 000, une taille de **1 km² par pixel** est admise. Un exemple est fourni dans le chapitre pour illustrer l'application de la méthode.

V.2.1. La probabilité antérieure

La méthode WofE représente la probabilité qu'un gisement minéral soit présent dans un pixel donné de la région d'étude, sans tenir compte des évidences prédictives (comme la géologie, la tectonique, etc.). Elle reflète donc la **densité** apparente de la minéralisation dans la zone étudiée.

Dans l'exemple donné :

- La région d'étude a une surface de **10 000 km²**, soit **10 000 pixels** (chaque pixel = 1 km²).
- On y observe **25 gisements connus** ($N(D) = 25$).

La probabilité antérieure est : $P(D) = N(D) / N(T) = 25 / 10\ 000 = 0,0025$, soit **0,25 %**. Cela signifie qu'en moyenne, **un pixel sur 40 contient une minéralisation**, sans tenir compte d'autres informations. Ce chiffre donne une première idée du potentiel minéral global de la région.

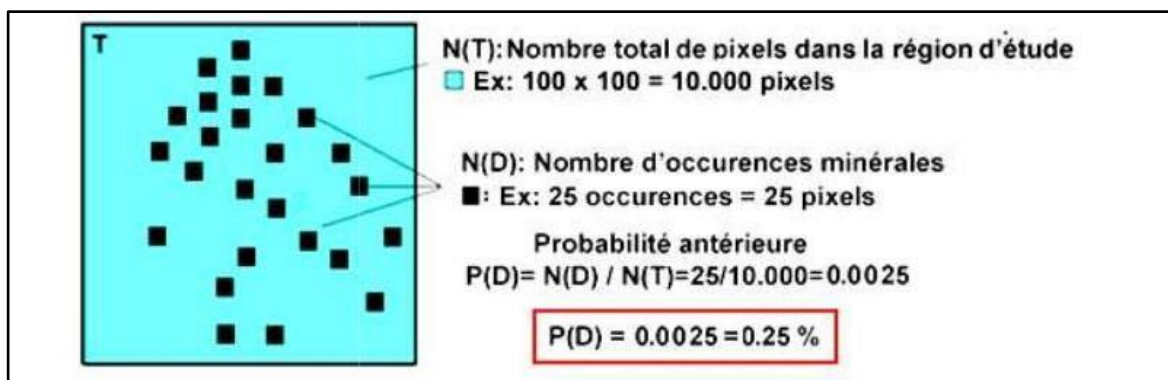


Figure 37: sens physique de la probabilité antérieure.

V.2.2. La probabilité postérieure

Est une mise à jour de la probabilité antérieure, en tenant compte de nouvelles informations, appelées « **évidences** ». Qui permettent d'affiner la prédiction de la présence de minéralisations.

Dans l'exemple suivant, deux évidences prédictives sont utilisées : B : pour le magmatisme, et E : pour la tectonique.

Ces informations sont intégrées dans la modélisation à travers des cartes prédictives binaires, qui servent à recalculer la **probabilité postérieure**.

V.2.3. Introduction du thème prédictif B

En appliquant le théorème de Bayes, la probabilité postérieure notée **P(D|B)** est définie comme étant la probabilité de l'occurrence minérale **D** étant donnée la présence de la condition B et se prononce : Probabilité de D sachant **B** et s'exprime mathématiquement par la formule suivante :

$$P(D|B) = P(D) * \frac{P(B|D)}{P(B)} \quad \text{(théorème de Bayes)} \quad (2.1)$$

$$P_{\text{Post}} = P_{\text{ant}} * \text{Facteur de Mise à Jour pour chaque carte binaire (ou FMJ)}$$

$$P(D|B) = \left(\frac{P(D|B)}{P(B)} = \frac{P(D \cap B)}{P(B)} \right).$$

$$P(B|D) = N(B|D)/N(D) = N(B \cap D) / N(D) \quad (2.2)$$

Elle est illustrée par le schéma suivant (Fig. 38)

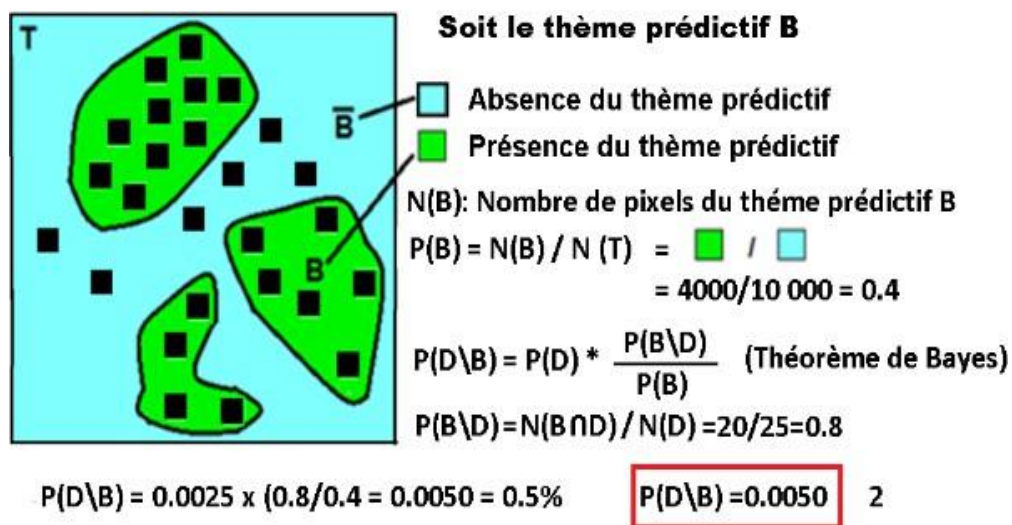


Figure 38: Probabilité postérieure de D étant donné la présence de l'évidence E.

V.2.4. Introduction du thème prédictif E

En introduisant un autre thème prédictif E ; la tectonique, ayant une surface $N(E) = 2500$ pixels contiennent 20 occurrences à l'intérieur du thème et seulement 5 occurrences en dehors du thème (Fig.39)

En appliquant le théorème de Bayes pour le thème évidentiel E on a :

$$P(D|E) = P(D) * \frac{P(E|D)}{P(E)} \quad \text{(Théorème de Bayes)} \quad (2.4)$$

En remplaçant par des chiffres on aura :

$$P(E|D) = 20 / 25 = 0.8 \quad P(E) = 2500 / 10000 = 0.25$$

$$P(D|E) = 0.0025 \times (0.8 / 0.25) = 0.010. \quad \text{Notez alors que } P(D|E) > P(D)$$

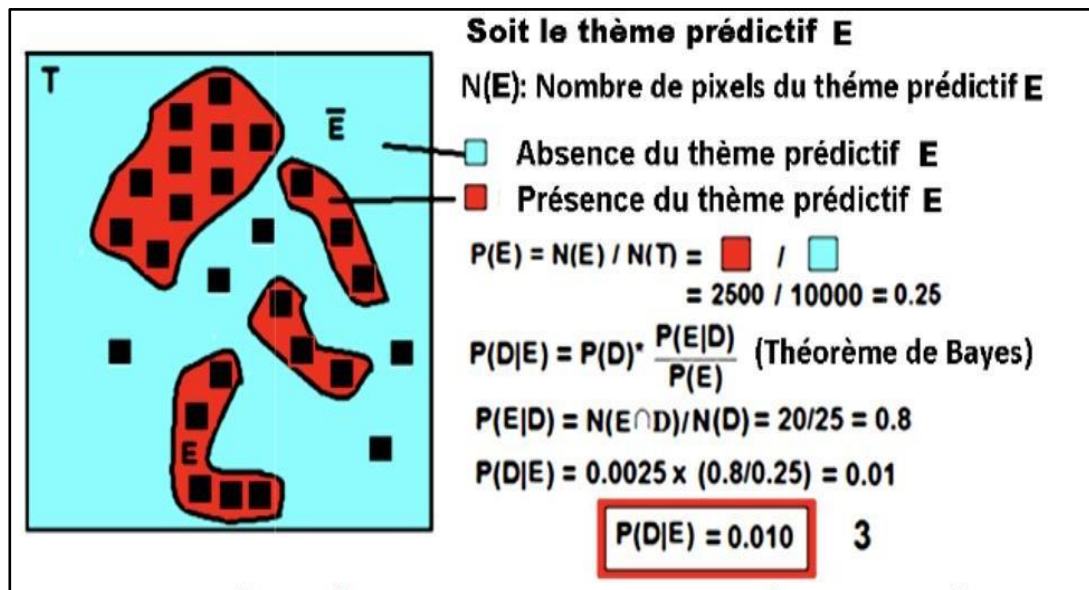


Figure 39: Probabilité postérieure de D sachant la présence de l'évidence E.

Pour un nombre « n » de cartes prédictives binaires, le théorème de Bayes s'écrit sous sa forme générale suivante :

Cette dernière valeur correspond à la probabilité postérieure de l'occurrence d'un gîte minéral D compte tenu de la présence des évidences

$$P(D|B) = P(D) * \frac{P(B1|D)}{P(B1)} * \frac{P(B2|D)}{P(B2)} * \frac{P(B3|D)}{P(B3)} \dots * \frac{P(Bn|D)}{P(Bn)} \quad (3)$$

$$P(D|B) = P(D) * FMJ \text{ carte}1 * FMJ \text{ carte} .2 * FMJ \text{ carte} 3 \dots * FMJ \text{ carte} n$$

Cette équation générale veut dire que

$$Probabilité_{post} = Probabilité_{ant} * FMJ \text{ de chaque carte prédictive} \quad (5bis)$$

En appliquant l'équation (3) pour les deux cartes prédictives binaires B et E nous aurons:

$$P(D | B,E) = P(D) * \frac{P(B|D)}{P(B)} * \frac{P(E|D)}{P(E)} \quad (4)$$

$$P(D | B,E) = 0.0025 \times (0.8/0.4) \times (0.8/0.25) = 0.02 = 2\%.$$

Cette valeur (2%) correspond à la probabilité postérieure de l'occurrence d'un gîte minéral D compte tenu de la présence des évidences prédictives B et E. (Fig.40) montre quatre zones ayant différentes valeurs de probabilité postérieure ; la carte obtenue montre que la zone en jaune, indiquant une forte probabilité postérieure, serait considérée comme la zone la plus perspective potentielle.

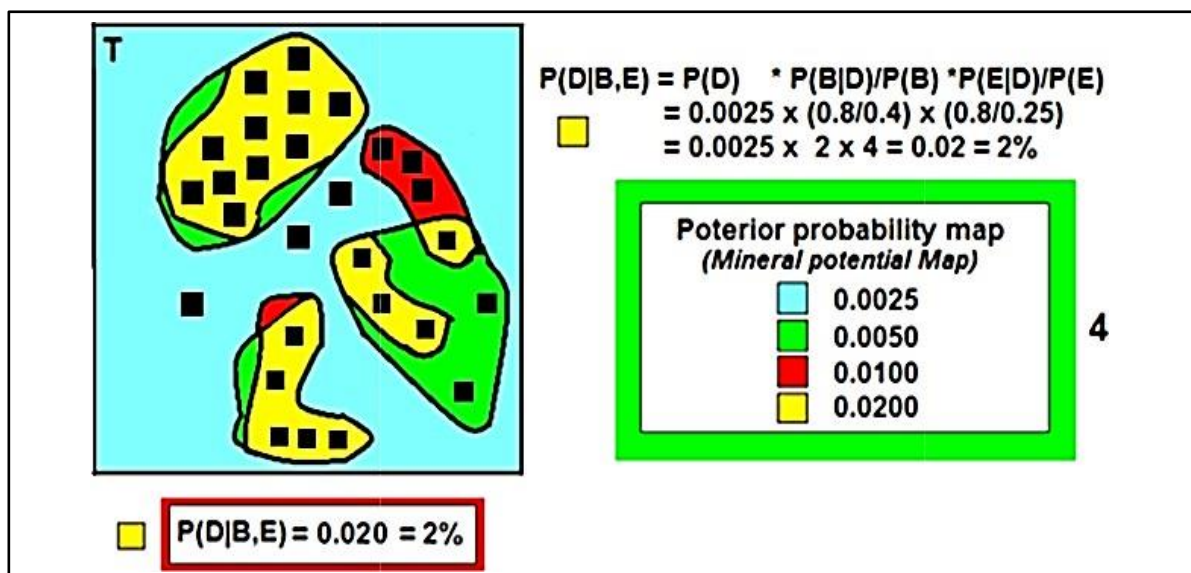


Figure 40: carte de probabilité postérieure de D sachant la présence de l'évidence B et E.

V.3. Les paramètres statistiques WofE calculés

La méthodologie et le programme de calcul des paramètres statistiques WofE, actuellement implémentée dans certains logiciels SIG tels que MapInfo et ArcGIS, permet de calculer tous les paramètres statistiques nécessaires pour l'analyse spatiale. Les plus importants pour la modélisation WofE sont :

- a- Les Poids (Weights) :** Lorsque le thème prédictif B est présent, le rapport de la probabilité de l'évidence B sachant la présence de D sur la probabilité de B sachant l'absence de D, qui s'écrit :

$$\frac{P(B|D)}{P(B|\bar{D})} \text{ est } > 1 \quad \text{Et s'appelle le "Sufficient Ratio" (ou le "Suffisant Rapport"}$$

Ou le suffisant Ratio : SR). Par définition, son Logarithme naturel correspond au poids positif (positive weight) noté W^+ . Il est exprimé par la formule suivante :

$$W^+ = \text{Ln} \frac{P(B|D)}{P(B|\bar{D})} = \text{Ln} \frac{N(B \cap D)/N(D)}{N(B \cap \bar{D})/N(\bar{D})}$$

Et inversement, lorsque le thème prédictif introduit est absent, Ce même rapport $\frac{P(B|D)}{P(B|\bar{D})}$ est

< 1 , et s'appelle le "Necessary Ratio" (le "Rapport Nécessaire » : NR). Son Log normal représente le **Poids négatif** (Negative weight), noté (W^-) et s'exprime comme suit :

$$W^- = \text{Ln} \frac{P(\bar{B}|D)}{P(\bar{B}|\bar{D})} = \text{Ln} \frac{N(\bar{B} \cap D)/N(D)}{N(\bar{B} \cap \bar{D})/N(\bar{D})}$$

- b- Les variances :** Pour chaque pair de poids (W^+ et W^-), les variances notées respectivement

$S^2(W^+)$ et $S^2(W^-)$ sont également calculées :

$$S^2(W^+) = \frac{1}{N(B \cap D)} + \frac{1}{N(B \cap \bar{D})}$$

La variance représente l'écart type sur le poids positif W^+ et s'écrit :

$$S^2(W^-) = \frac{1}{N(\bar{B} \cap D)} + \frac{1}{N(\bar{B} \cap \bar{D})}$$

Et l'écart type sur le poids négatif W^-

c- Le contraste: est un paramètre Wofe le plus fondamental dans le processus de modélisation. Noté " C " correspond à la différence entre chaque paire de poids calculés pour une évidence donnée et s'écrit : $C = (W^+ - W^-)$.

Ce paramètre " C " mesure l'association spatiale entre les points d'entraînement et l'évidence prédictive utilisée dans la modélisation.

- Si $C > 0$, l'association est **positive**.
- Si $C < 0$, l'association est **négative**.
- Si $C = 0$, cela indique une **perte de données**. (Missing data)

Une valeur élevée de C signifie une forte association spatiale, est une faible valeur indique une faible association, suggérant que l'évidence est peu pertinente.

d- Le Studentized Contraste : (Stud (C)): Quand plus de 20 points de contrôle sont disponibles (Carranza, 2004), on observe un maximum du contraste " C ", ce qui facilite le reclassement de la carte prédictive. En revanche, si le contraste " C " est faible, la fiabilité du thème prédictif diminue, et il devient nécessaire d'introduire un autre paramètre : le « Studentized Contrast » aussi appelé « Confidence » dans ArcSDM ou (confiance).

Ce Stud C est le rapport entre le contraste " C " et son écart type $s(C)$, ce qui permet d'évaluer la significativité statistique du contraste, s'écrit de la manière suivante :

$$\text{Stud}(C) = C/s(C) = C / \sigma = C / \text{Studentized } C$$

Ainsi, la base scientifique de la modélisation par la méthode Wofe consiste à chercher le thème géoscientifique prédictif contenant un grand nombre de points d'entraînement, c'est à dire là où le poids positif (W^+) est positif et grand et le poids négatif (W^-) est négatif et petit donnant ainsi une plus large valeur du contraste " C " indiquant aussi prédictive une plus forte association spatiale entre les points d'entraînement et les évidences choisies. Ce qui indique forcément que le thème prédictif sélectionné est le plus cohérent et le plus robuste.

V.4. Étapes suivis pour la Modélisation géomatique prédictive

Étape 1 : Édification d'un SIG (format vecteur) : Cette étape consiste à collecter, numériser, géoréférencé et vectoriser les données géo-scientifiques de la feuille de Tahifet. L'objectif est de produire une base de données intégrant l'ensemble des couches pertinentes pour la modélisation prédictive, notamment la lithologie, la tectonique, la géochimie, et les indices minéralisés et gisements connus. (Fig.41, 42, 43, 44, 45, 46,47, 48,49).

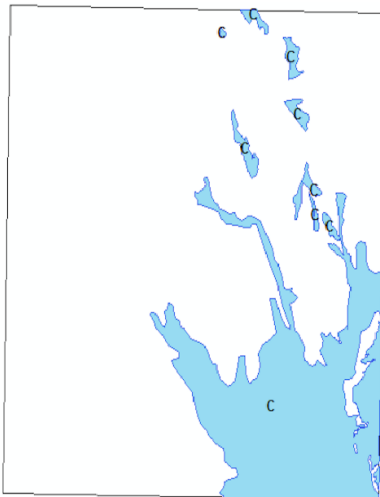


Figure 41: Couche Néoprotérozoïque.

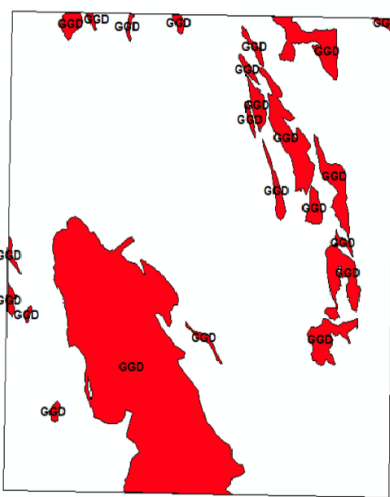


Figure 42: Couche granitegranodiorite.



Figure 43: Couverture.

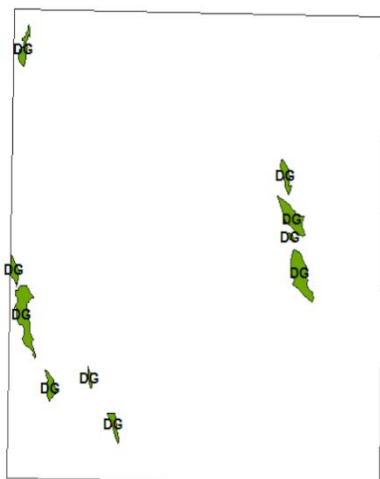


Figure 46: Couche diorite et gabbro.



Figure 45: Couche série Arehchoum.

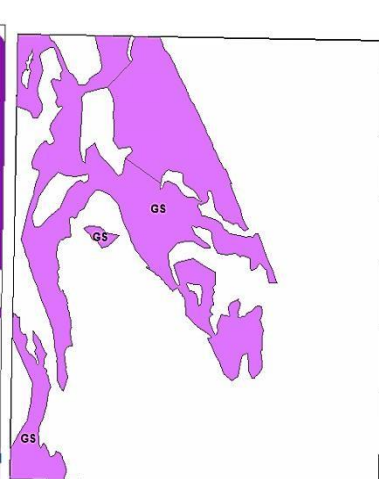


Figure 44: Couche série Aleksod.

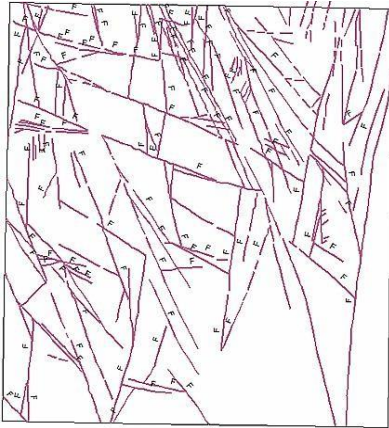


Figure 48: AG.

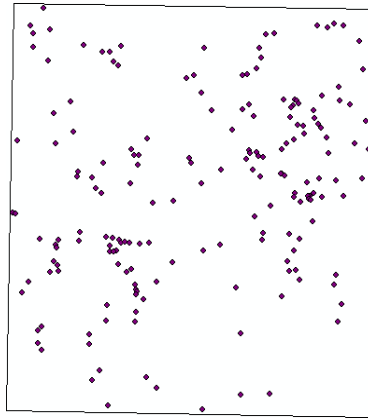


Figure 49:
vectorisation
des failles.

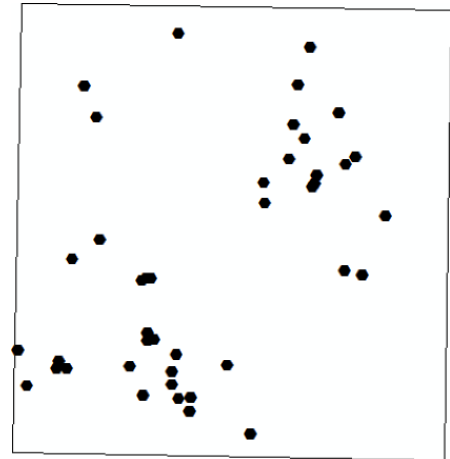


Figure 47: indice
de minéralisation.

Étape 2 : Préparation de données à l'analyse

✓ Définition des paramètres du SDM :

Cela consiste à définir le projet Arc-SDM, ce qui consiste à spécifier le masque de la zone d'étude, la taille adoptée du pixel (unité cellulaire), les sites d'apprentissage (points d'entraînement), ainsi que toutes les cartes évidentielles prédictives sélectionnées.

✓ Masque de la zone d'étude :

Dans le cadre de la cartographie du potentiel minéral avec la modélisation WofE, les calculs sont réalisés en format raster. La zone d'étude est définie par un masque polygonal correspondant au contour de la feuille de Tahifet à l'échelle 1/200.000, délimitée par les coordonnées géographiques 6° à 7° de longitude et 22° à 23° de latitude.

✓ Taille de la cellule unitaire :

Dans ce projet, la taille de la cellule unitaire a été fixée à 1 pixel pour 1km², représentant la résolution spectrale minimale des données utilisées. Le détail concernant le choix de cette résolution est décrit par (Carranza, 2009).

✓ Sites d'entraînement :

Selon (Fabbri et Chung, 2008), pour une bonne extrapolation spatiale, les points d'entraînement doivent être de genèse géologiquement similaire aux cibles à localiser. (Carranza et al, 2008) soulignent que des sites d'entraînement cohérents améliorent la modélisation WofE. Le fichier « sites d'entraînements » a été produit à partir du fichier Excel « Minéralisations » obtenu à partir du catalogue des minéralisations du rapport systématique et levé géologique au 1/200000 de Tahifet (EREM ; Bezouglkh, 1990). Ce fichier Excel a été transformé ensuite en un shapfile (Fig.50).

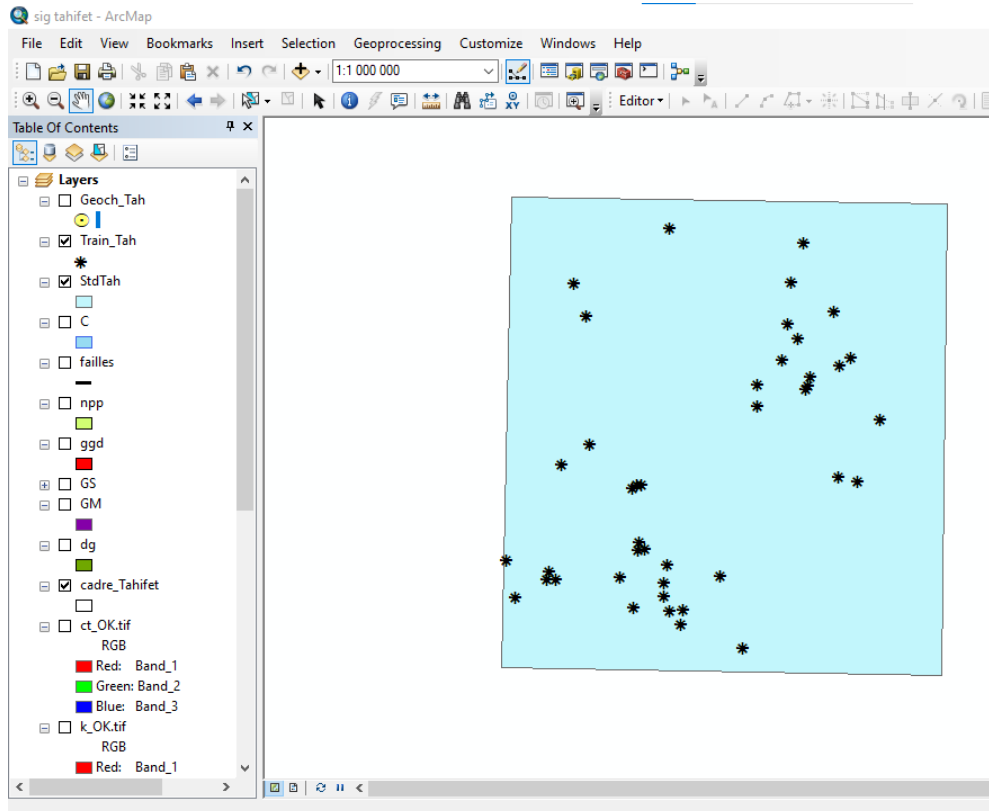


Figure 50: Shape file obtenu à partir du fichier Excel minéralisations.

- **Cartes évidentielles prédictives :**

Les cartes évidentielles prédictives sélectionnées sont : Carte lithologique ; tectonique ; anomalies géochimiques (Fig.51, 52,53)

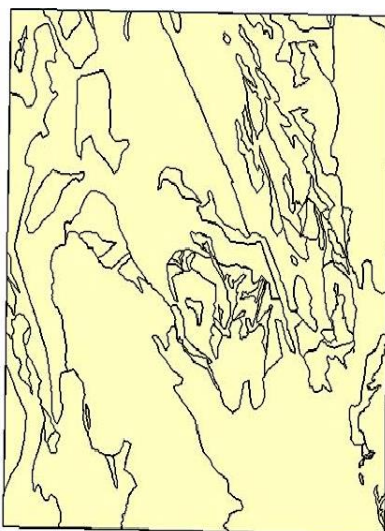


Figure 52: Carte Tectonique.

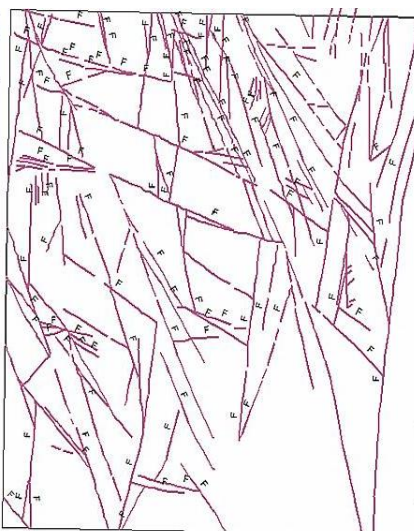


Figure 53: Carte lithologique.

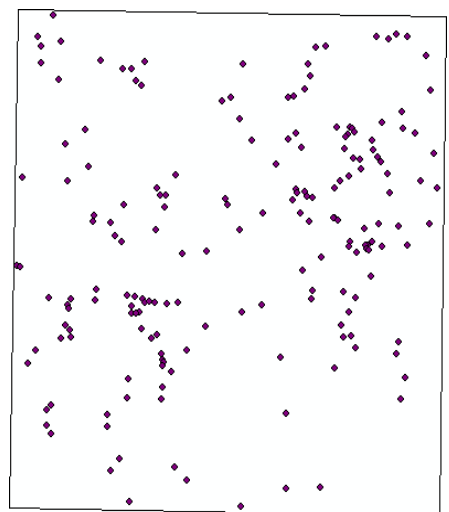


Figure 51: Carte d'Anomalies géochimiques.

Étape 3 : Analyse spatiale et création de carte prédictive binaire

- **Analyse des preuves lithologiques :**

Les preuves géologiques dérivées principalement de la carte géologique montrent six unités lithologiques ayant des caractéristiques différentes, en utilisant les points d'entraînements. La carte prédictive binaire a été obtenue en cinq étapes (**Fig.54**) :

- Étape 1 : extraction de la couche lithologie vecteur à partir du SIG.
- Étape 2 : Transformation du fichier vecteur en raster.
- Étape 3 : Calcul du poids.
- Étape 4 : reclassification de l'évidence lithologie en carte prédictive binaire lithologie en analysant les valeurs des paramètres WofE ($w+$, $w-$, contraste, et le studentized contrast).
- Étape 5 : recalcul du poids de la carte binaire obtenue.

Les cinq étapes utilisées sont résumées dans le schéma suivant :

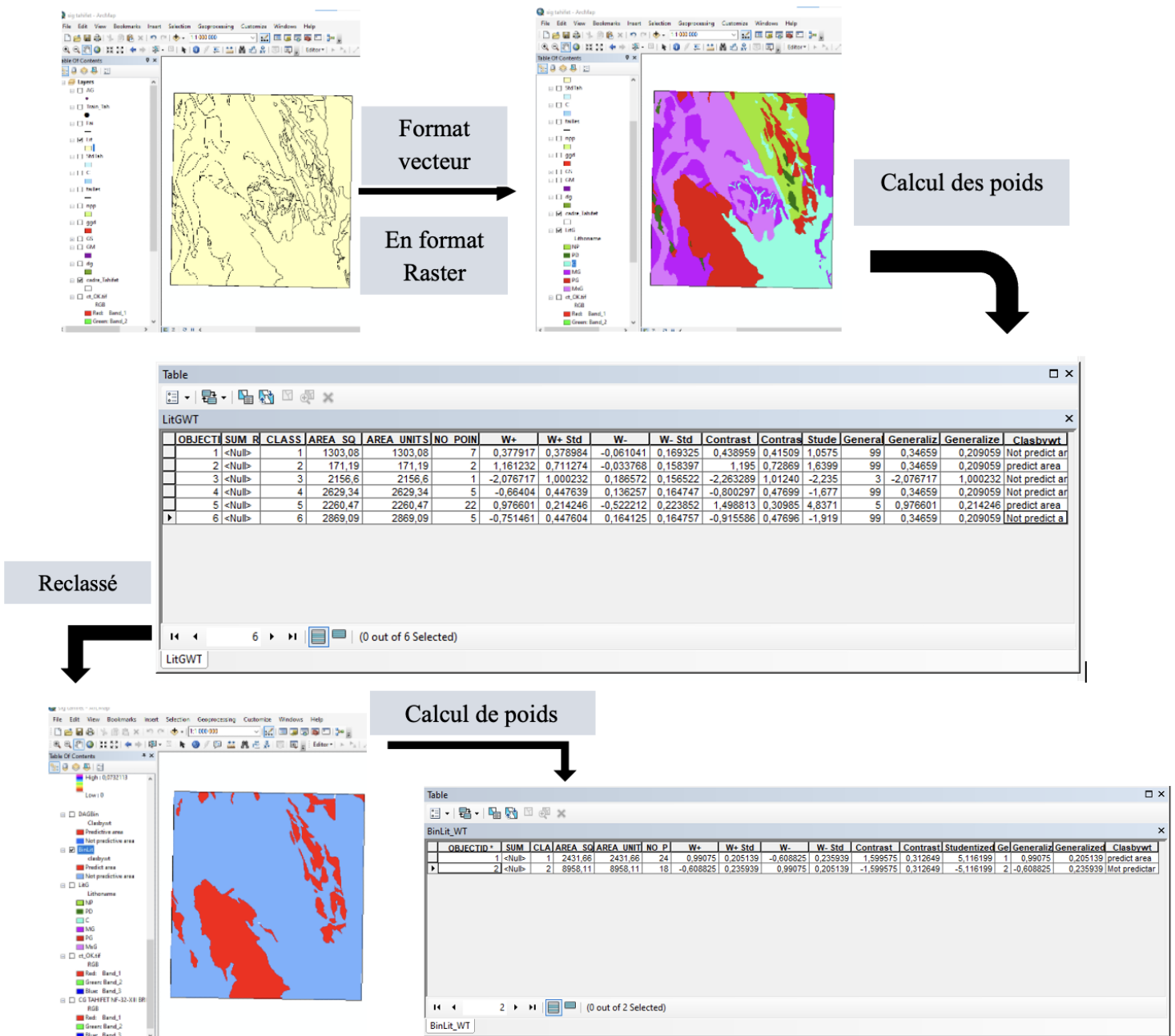


Figure 54: schéma montrant les différentes étapes de la modélisation Wofe

• **Analyse des preuves tectoniques :**

Étant donné l'importance des preuves structurales dans le processus de la mise en place de la minéralisation, deux cartes prédictives binaires ont été dérivées à partir de la carte évidentielle prédictive « failles ». Pour l'analyse des preuves tectoniques, nous avons suivi les mêmes étapes que pour la « lithologie », le résultat est donné dans la (Fig. 55)

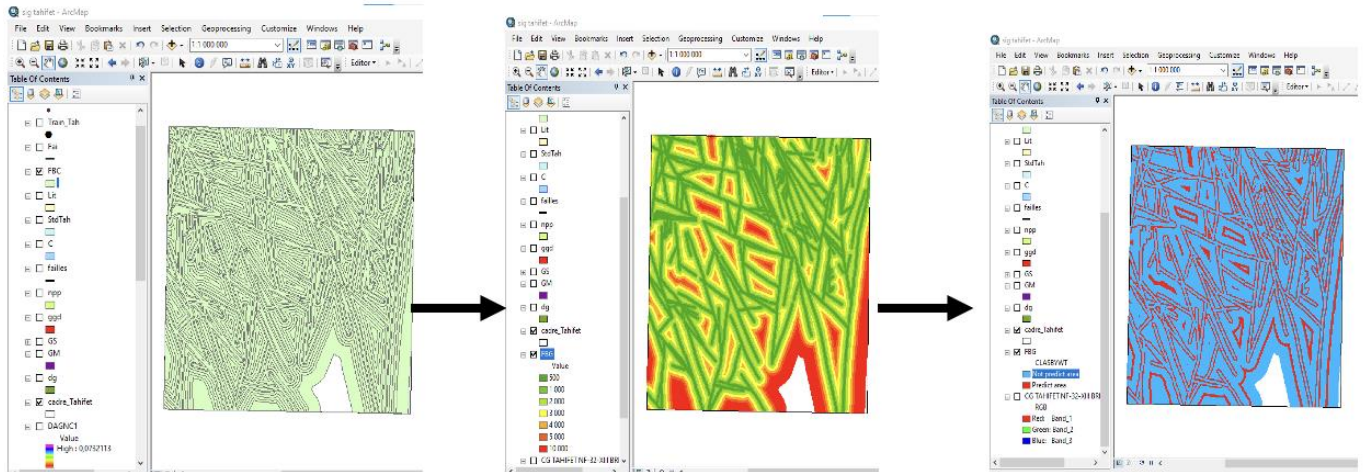


Figure 55: création de la carte binaire « Proximité de faille ».

Ensuite à partir de la même carte évidentielle prédictive « failles » la carte binaire « Densité de faille » a été générée en suivant également les mêmes étapes (Fig.56).

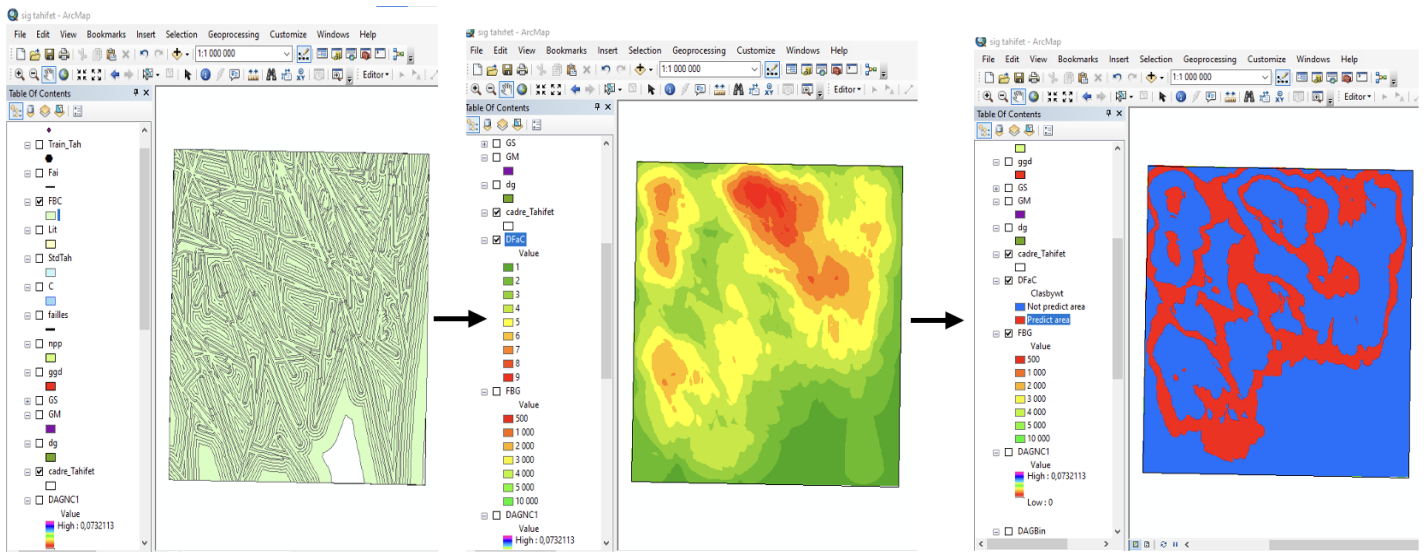


Figure 56: création de la carte binaire « Densité de faille ».

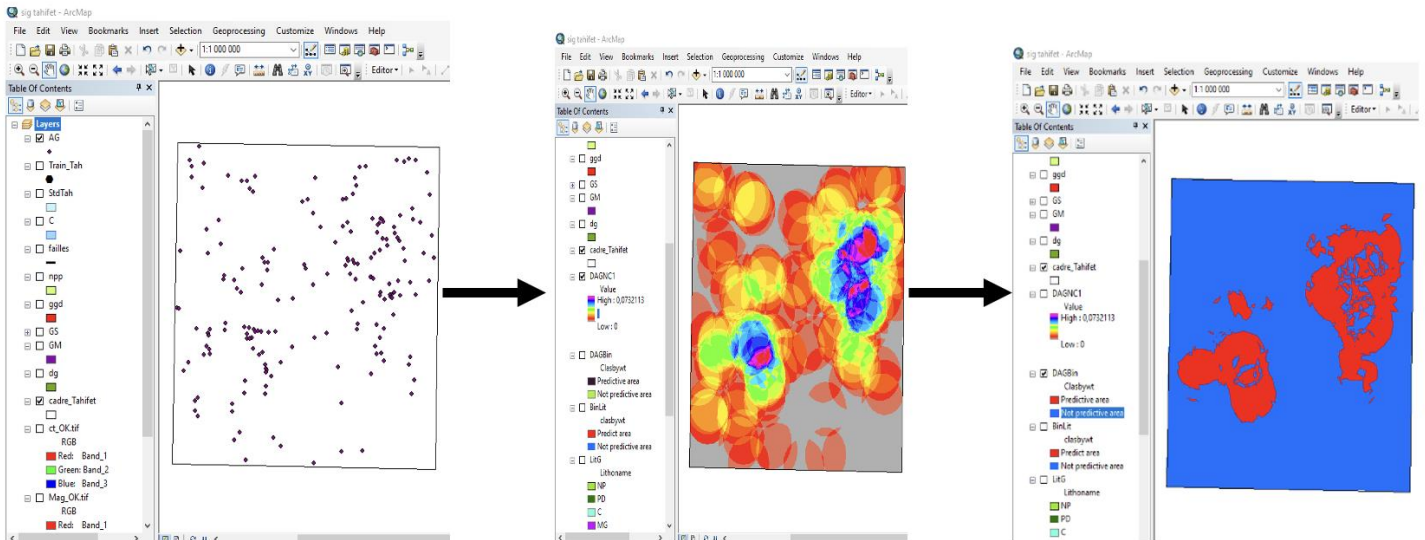


Figure 57: création de la carte binaire « Anomalie géochimiques ».

- **Analyse des preuves des anomalies géochimiques :**

Les minéralisations prouvées par analyse chimique ont également été utilisées dans le traitement WofE. Cette couche est dérivée à partir de 189 anomalies géochimiques collectées dans la zone d'étude. Nous avons utilisé aussi les mêmes étapes que celles décrites ci-dessus pour analyser les preuves « anomalies géochimiques ».

Étape 4 : Combinaison des cartes binaires :

En combinant les cartes binaires dérivés des cartes évidentielles prédictive : lithologie, tectonique, géochimie (AG) nous avons pu obtenu une carte binaire finale représentant le modèle prédictif qui représente la carte du potentiel minéral non corrigé.

Cette dernière a été ensuite soumise au test d'indépendance conditionnelle (CI) qui nous a permis d'obtenir la carte finale qui est la carte du potentiel minéral (**Fig.58**).

La carte du potentiel minéral obtenue représente mathématiquement une carte de probabilité représentée par deux classes : la première classe (zones en bleu) qui correspondent aux secteurs à faible potentiel minéral donc des régions faiblement perspective pour la recherche et l'exploration ultérieure, et une seconde classe (zones en rouge) qui représentent les secteurs potentiels donc les plus intéressants pour les recherches minières futures de l'or et des métaux rares dans la région de Tahifet. Ces dernières qui montrent donc un fort potentiel minéral représentent les secteurs prioritaires et les plus intéressants pour les campagnes et sociétés d'exploration minérale.

Sur cette carte on voit donc que les secteurs d'exploration sont réduits à une surface minimale ce qui réduit au maximum les coûts d'exploration.

La carte du potentiel minérale obtenue montre clairement l'existence de deux grands secteurs prospectifs :

Le premier situé au sud-ouest de la carte et qui est étroitement liée aux minéralisations filoniennes (filons de quartz et greisen) associées aux granites migmatitiques, ce qui est connu depuis très longtemps au Hoggar.

Le deuxième secteur prospectif situé au Nord-Est de la feuille de Tahifet est situé en gros dans les formations volcano-sédimentaires du Néoprotérozoïque ce qui n'est pas habituel.

- **Les points d'entraînements (Training points)** sont majoritairement localisés dans ou à proximité des zones potentiel, ce qui **valide la pertinence du modèle prédictif** utilisé pour générer cette carte.
- **Il est également important de souligner** que certaines **zones potentielles ne présentent aucun indice**, ce qui signifie qu'elles n'ont pas encore été explorées ou qu'aucune occurrence n'y a été identifiée jusqu'à présent. Ces secteurs à fort potentiel mais sans données connues doivent être considérés comme des **zones cibles prioritaires pour des campagnes d'exploration futures**, car ils pourraient héberger des minéralisations aurifères et en métaux rares non découvertes.

Certains secteurs soulignés comme prospectif on observe dans certains endroits des minéralisations déjà découvertes (training points) mais dans d'autres endroits dépourvus d'indices découvert ce qui est indiqué pour les premiers endroits qu'ils ont été peu ou pas explorés.

Nous recommandons donc vivement d'orienter les futurs travaux d'explorations vers les zones non investiguées tout d'abord (zones en rouge dépourvues de points d'entraînement) qui représente les secteurs prospectifs découverts.

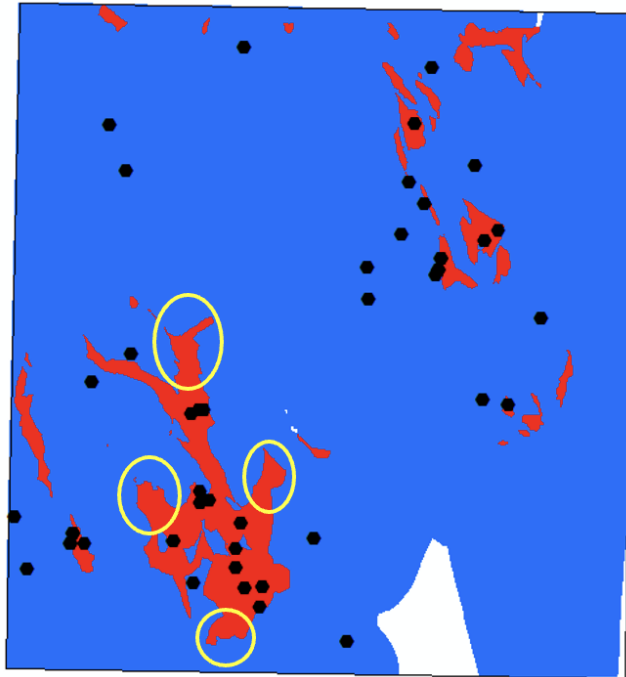


Figure 58: carte du potentiel minéral (secteurs peu prospectés).

On recommande aussi de prévoir des travaux complémentaires dans les secteurs potentiels nouvellement découverts (zones en rouge dépourvus de points d'entraînement) et qui représente l'extension des zones potentielles déjà connues.

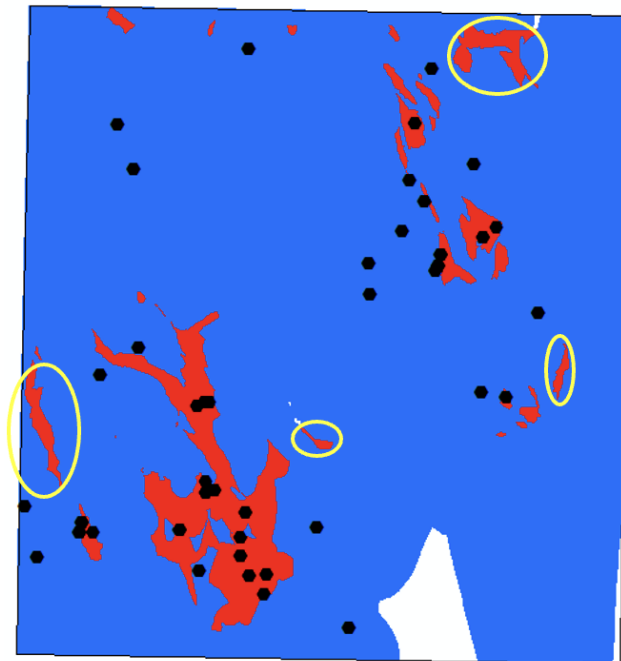


Figure 59: carte du potentiel minéral (avec nouveaux secteurs prospectés).

Conclusion générale

Conclusion

L'objectif de ce mémoire était de contribuer à la valorisation et à la cartographie du potentiel aurifère et des métaux rares de la région de Tahifet, à travers une approche géoscientifique moderne utilisant des outils géomatiques nouveaux basés sur les Systèmes d'Information Géographique (SIG).

Dans un premier temps, une synthèse géologique traitant du contexte géologique régional et local a été réalisée ce qui a permis de mieux comprendre le contexte géologique, magmatique et structurale de la région d'étude

La subdivision du Hoggar en différents domaines structuraux et terranes, ainsi que les caractéristiques pétrographiques de la feuille de Tahifet, ont été ensuite minutieusement présentées afin d'identifier les différentes unités géologiques favorables à l'accumulation des minéralisations du type recherché.

Par la suite, des généralités sur les SIG ont été exposées mettant en lumière son importance dans l'acquisition, le traitement, la représentation et l'analyse des données spatiales en géologie. Une attention particulière a été portée à l'utilisation du logiciel ArcGIS, avec ses différents modules (ArcMap, ArcCatalog, ArcToolbox), pour l'édification du SIG de la région d'étude.

L'intégration des données géologiques, structurales, magmatiques et de minéralisations dans un environnement SIG a constitué une importante base de données géoscientifique pour effectuer la modélisation prédictive sélectionnée.

La méthode des Poids de l'Évidence (Weights of Evidence – WofE), fondée sur une approche bayésienne, nous a permis tout d'abord de quantifier la relation spatiale entre les différents thèmes géoscientifiques prédictifs et les occurrences minérales connues de la région d'étude. Le calcul des paramètres statistiques (les poids ; W_{plus} et W_{minus} , contrast et le studentized contrast), a conduit à la reclassification des cartes prédictives multi-classe en cartes binaires que nous avons combinés en utilisant un modélisateur des données spatiales (ArcSDM), qui nous a permis de générer la carte du potentiel minéral recherchée.

La carte du potentiel minéral obtenue montre clairement l'existence de deux grands secteurs perspectifs : i : Le premier situé au sud-ouest de la feuille de Tahifet contient des minéralisations de type filonien associées aux granites migmatitiques, ce qui est connu depuis très longtemps au Hoggar. ii : Le second secteur situé au Nord-Est de notre région d'étude est inclus dans les formations volcano-sédimentaires du Néoprotérozoïque.

Ce travail a mis en évidence l'apport considérable et inestimable de l'approche

géomatique dans l'exploration minière. La carte obtenue permet une gestion optimale des données et une meilleure visualisation des zones cibles. La région de Tahifet, en raison de ses caractéristiques géologiques complexes et de ses indices métallifères recensés, se présente comme une zone prometteuse pour de futures campagnes d'exploration aurifère et des métaux rares.

Enfin, cette démarche méthodologique, qui peut être reproduite dans d'autres régions du Hoggar ou ailleurs, contribuera sans aucun doute à une exploration plus ciblée, rationnelle et économiquement viable.

L'association entre la géologie de terrain, les SIG et la modélisation statistique représente aujourd'hui un outil indispensable pour les géoscientifiques dans la recherche de nouvelles ressources minérales pour le pays.

*Références
bibliographiques*

- Aït Hamou, F. & Dautria, J.-M. (1994).** Le magmatisme cénozoïque du Hoggar : une synthèse des données disponibles. Mise au point sur l'hypothèse d'un point chaud. *Bulletin du Service Géologique de l'Algérie*, 5(1), 49–68.
- Aït Hamou, F., Dautria, J.-M., Cantagrel, J.-M., Dostal, J. & Briquieu, L. (2000).** Nouvelles données géochronologiques et isotopiques sur le volcanisme cénozoïque de l'Ahaggar (Sahara algérien) : des arguments en faveur de l'existence d'un panache. *Comptes Rendus de l'Académie des Sciences de Paris*, 330, 829–836.
- Amri, A. (2008).** *Étude géologique du massif de l'Ahaggar : structure et minéralisations*. Thèse de Doctorat, Université d'Alger.
- Antonov et al, (1976).** Travaux géologiques dans le Hoggar central.
- Barbey, P., Bertrand, J.M., Angoua, S.E. & Dautel, D. (1989).** Petrology and U/Pb geochronology of the Telohat migmatites (Aleksod, central Hoggar, Algeria). *Contrib. Mineral. Petrol.*, 101, 207–219.
- Beccaluva, L., Azzouni-Sekkal, A., Benhallou, A., Bianchini, G., Ellam, R.M., Marzola, M., Siena, F. & Stuart, F.-M. (2007).** Intracratonic asthenosphere upwelling and lithosphere rejuvenation beneath the Hoggar swell (Algeria) : Evidence from HIMU metasomatised lherzolite mantle xenoliths. *Earth and Planetary Science Letters*, 260(3–4), 482–494.
- Beuf, D., Biju-Duval, B., De Charpal, O., Gariel, O. & Bennacef, A. (1968).** Une conséquence directe de la structure du bouclier africain : l'ébauche des bassins de l'Ahnet et du Mouydir, au Paléozoïque inférieur. *Bull. Serv. Carte Géol. Algérie*, 38, 105.
- Beuf, S., Biju-Duval, B., De Charpal, O., Rognon, P., Gariel, O. & Bennacef, A. (1971).** Example of cratonic sedimentation: Lower Paleozoic of Algerian Sahara. *AAPG Bulletin*, 55(12), 2225–2245. doi:10.1306/819A3E32-16C5-11D7-8645000102C1865D
- Bertrand, J.M. (1968).** Un socle remobilisé en Ahaggar oriental : les gneiss de l'Arechchoum. *Bull. Soc. Géol. Fr.*, X, 566–568.
- Bertrand, J.M. (1974).** Évolution polycyclique des gneiss du Précambrien de l'Aleksod (Hoggar Central, Sahara algérien). Aspects structuraux, pétrologiques, géochimiques et géochronologiques. Éd. CNRS (CRZA), Sér. Géol., 19, 350 p.
- Bertrand, J.M. & Caby, R. (1978).** Geodynamic evolution of the Pan-African orogenic belt : a new interpretation of the Hoggar shield (Algerian Sahara). *Geologische Rundschau*, 67(2), 357–388.
- Bertrand, J.M. & Lasserre, M. (1976).** Pan-African and pre-Pan-African history of the Hoggar (Algerian Sahara) in the light of new geochronological data from the Aleksod area.

Precambrian Res., 3, 343–362.

Bertrand, J.M., Boissonnas, J., Caby, R., Gravelle, M. & Lelubre, M. (1966). Existence d'une discordance dans l'Antécambrien du "Fossé Pharusien" de l'Ahaggar occidental (Sahara central). C.R. Acad. Sci. Paris, 262D, 2197–2200.

Bertrand, J.M., Caby, R., Ducrot, J., Lancelot, J., Moussine-Pouchkine, A. & Saadallah, A. (1978). The late Pan-African ensialic linear fold belt of eastern Hoggar (Algeria) : geology, structural development, U/Pb geochronology, tectonic implications for the Hoggar shield. *Precambrian Res.*, 7, 349–376.

Bertrand, J.M., Caby, R., Fabrès, J. & Vitel, G. (1968). Sur la structure et l'évolution orogénique du Précambrien du Tazat (Ahaggar oriental). C.R. Somm. Soc. Géol. Fr., B, 257–258.

Bertrand, J.M., Michard, A., Boullier, A.M. & Dautel, D. (1986a). Structure and U/Pb geochronology of the Central Hoggar (Algeria). *Tectonics*, 5(7), 955–972.

Bertrand, J.M., Meriem, D., Lapique, F., Michard, A., Dautel, D. & Gravelle, M. (1986b). Nouvelles données sur l'âge de la tectonique pan-africaine dans le rameau oriental de la chaîne Pharusienne (Timgaouine, Hoggar, Algérie). C.R. Acad. Sci. Paris, 302, 437–440.

Bertrand, J.M., Michard, A., Dautel, D. & Pillot, M. (1984). Âges U/Pb éburnéens et pan-africains au Hoggar central (Algérie) : conséquences géodynamiques. C.R. Acad. Sci. Paris, D298, 643–646.

Black, R., Caby, R., Moussine-Pouchkine, A., Bayer, R., Bertrand, J.M., Boullier, A.M., Fabre, J. & Lesquer, A. (1979). Evidence for late Precambrian plate tectonics in West Africa. *Nature*, 278, 223–227.

Black, R., et al. (1994). Géologie simplifiée du bouclier du Hoggar (Touareg). *Journal of African Earth Sciences*, 19(1), 1–15.

Blaise, J. (1967). Le Précambrien du Tazat. Sa place dans les structures du Hoggar oriental. C.N.R.S., Sér. Géol., 7, 197 p.

Boissonnas, J. (1973). Les granites à structures concentriques et quelques autres granites tardifs de la chaîne panafricaine en Ahaggar (Sahara central, Algérie). C.N.R.S., Sér. Géol., 16, 662 p.

Boullier, A.M. (1979). Charriage et déformations de l'Unité Granulitique des Iforas au cours de l'orogénèse panafricaine. *Rev. Géogr. Phys. Géol. Dyn.*, 21, 377–382.

Boullier, A.M. (1982). Étude structurale du centre de l'Adrar des Iforas (Mali). Mylonites et tectogénèse. Thèse d'État, INPL Nancy, 327 p.

Boullier, A.M. (1991). The Pan-African Trans-Saharan belt in the Hoggar shield (Algeria, Mali, Niger) : a review. In R.D. Dallmeyer & J.P. Lécorché (Eds.), *The West African orogens and*

circum-Atlantic correlatives (pp. 85–105). Springer-Verlag.

Boullier, A.M. & Bertrand, J.M. (1981). Tectonique tangentielle profonde et couloirs mylonitiques dans le Hoggar central polycyclique (Algérie). Bull. Soc. Géol. Fr., XXIII, 17–22.

Briedj, M. (1993). Étude géologique de la région de Tahifet (Hoggar central, Algérie) : implications géodynamiques. Thèse, Université de Nancy I (non publiée).

Briedj, M. (2002) - Notice explicative de la carte géologique à 1/200 000 de Tahifet Office National de Recherche géologique et Minière (ORGM), Edition du service Géologique de l'Algérie, Boumerdès

B.R.M.A. (1955-1957, 1959-1960). Levés géologiques de reconnaissance à l'échelle 1/200 000. **CABY, R. (1968).** Une zone de décrochements à l'échelle de l'Afrique dans le Précambrien de l'Ahaggar occidental. Bulletin de la Société Géologique de France (7) X, 577–587.

CABY, R. (1970). La chaîne Pharusienne dans le Nord-Ouest de l'Ahaggar (Sahara central, Algérie) ; sa place dans l'orogénèse du Précambrien supérieur en Afrique. Thèse d'État, Université de Montpellier, 336 p.

CABY, R., BERTRAND, J.M. & BLACK, R. (1981). Pan-African closure and continental collision in the Hoggar-Iforas segment, Central Sahara. In : Kroner, A. (Ed.), Precambrian Plate Tectonics, Elsevier, Amsterdam, 407–434.

CARRANZA, E.J.M. (2009). Geochemical anomaly and mineral prospectivity mapping in GIS, Handbook of Exploration and Environmental Geochemistry, Vol. 11. Elsevier, UK, 351 p.

CHEILLETZ, A., BERTRAND, J.M., CHAROY, B., MOULAHOU, O., BOUABSA, L., FARRAR, E., ZIMMERMANN, J.L., DAUTEL, D., ARCHIBALD, A.D. & BOULLIER, A.M.

(1992). Géochimie et géochronologie Rb-Sr, K-Ar et $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ des complexes granitiques panafricains de la région de Tamanrasset (Algérie) : relations avec les minéralisations Sn-associées et l'évolution tectonique du Hoggar Central. Bulletin de la Société Géologique de France, 163(6), 733–750.

CHIKHAOUI, M. (1981). Les roches volcaniques du Protérozoïque supérieur de la chaîne Pan- Africaine (Hoggar, Anti-Atlas, Adrar des Iforas). Thèse de Doctorat d'État, Université de Montpellier, 183 p

Dautria, J.-M. (1988). Relations entre les hétérogénéités du manteau supérieur et le magmatisme en domaine continental distensif : exemple des basaltes alcalins du Hoggar (Sahara

central, Algérie). Thèse de doctorat d'état, Université Montpellier, 239 p.

Dautria, J. M., & Lesquer, A. (1989). An example of the relationship between rift and dome: recent geodynamic evolution of the Hoggar swell and of its nearby regions (Central Sahara, Southern Algeria and Eastern Niger). *Tectonophysics*, 163(1-2), 45-.

Deschamps, M.T. (1973). Étude géologique de la série de l'Aréchéchoum dans la région de Tamanrasset (Hoggar, Sahara central). Thèse 3^e cycle, Univ. Nancy, 139 p.

DeMers, M. N. (2008). "Fundamentals of Geographic Information Systems". "Wiley.

Duplan, L. (1972). La chaîne de l'Egéré (Hoggar septentrional). *Bull. Serv. Géol. Algérie*, 26, 2 tomes.

Fabbri, A. G., Jo, C., & Chung, C.-F. (2008). On blind tests and spatial prediction models. *Natural Resources Research*, 17, 107–118.

Fabriès, J., & Gravelle, M. (1977). Modalités du magmatisme au Protérozoïque supérieur dans la région de Silet (Hoggar Central). *Bulletin de la Société Géologique de France*, XIX, 995–1004.

Foucault, A., & Raoult, J.-F. (1988). Dictionnaire de Géologie (3^e éd. Révisée). Masson.

Girod, M. (1971). Le massif volcanique de l'Atakor (Hoggar, Sahara algérien). Éditions du C.N.R.S., Paris, 159 p.

(Même auteur : Thèse de doctorat, Faculté des Sciences de Paris, 1971.)

Girod, M. (1971). *Le massif volcanique de l'Atakor (Hoggar, Sahara algérien)*. Éditions du C.N.R.S., Paris, 159 p.

Gravelle, M. (1969). Recherches sur la géologie du socle précambrien de l'Ahaggar centrooccidental dans la région de Silet-Tibehaouine. Thèse d'État, Univ. Paris, 298 p.

Haddoum, H. (1984). Lithologie, évolution structurale et géodynamique des terrains précambriens d'Abankor-Timgaouine (Hoggar occidental). Thèse de 3^e cycle, Université Paris-Sud Orsay, 182 p.

Heywood, I., Cornelius, S., & Carver, S. (2011). An Introduction to Geographical Information Systems. Pearson.

Igoudjilen, M. (2018). Cartographie SIG au 1 /200.000 de la région de Tahifet – in Abeggui (Hoggar central, Algérie), géologie et minéralisation associées. Mémoire de Master.

Kilian, C. (1932). Sur des conglomérats précambriens du Sahara central : le Pharusien et le Suggarien. *Comptes Rendus sommaires de la Société Géologique de France*, 7, 87.

Lakhoua, M.N. (2007). Contribution à l'étude des systèmes d'information géographique : applications et enjeux.

Lapique, F., Bertrand, J.M. & Meriem, D. (1986). A major Pan-African decoupling zone

in the Timgaouine area (western Hoggar, Algeria). *Journal of African Earth Sciences*, 5, 617–625.

Latouche, L. (1978). Le Précambrien de la région des Gour Oumelalen (NE de l’Ahaggar, Algérie). Thèse d’État, Paris VII.

Latouche, L. (1985). Les collisions intracratoniques et la tectonique intracontinentale dans le Pan- Africain du Hoggar central. CIFEG, Paris.

Latouche, L. & Vidal, Ph. (1974). Géochronologie du Précambrien de la région des Gour Oumelalen (NE de l’Ahaggar, Algérie). Un exemple de mobilisation du strontium radiogénique. *Bulletin de la Société Géologique de France*, XVI, 195–203.

Lelubre, M. (1952). Recherches sur la géologie de l’Ahaggar central et occidental (Sahara central). *Bulletin du Service de la Carte Géologique de l’Algérie*, 2^e série, 22, 2 tomes.

Lesquer, A., Bourmatte, A., & Dautria, J.M. (1988). Deep structure of the Hoggar domal uplift (Central Sahara, South Algeria) from gravity, thermal and petrological data. *Tectonophysics*, 152(1–2), 71–87.

Lesquer, A., Bourmatte, A., Ly, S., & Dautria, J.M. (1989). First heat flow determination from the central Sahara: relationship with geological structures.

Liégeois, J.P. & Black, R. (1984). Pétrographie et géochronologie Rb-Sr de la transition calco-alcaline fini-panafricaine dans l’Adrar des Iforas (Mali) : accréation crustale au Précambrien supérieur. In : *Géologie africaine ; Klerks, J. & Michot, J. (Eds.), Musée royal de l’Afrique centrale, Tervuren*, pp. 115–145.

Liégeois, J.P., Bertrand, J.M. & Black, R. (1987). The subduction- and collision-related Pan-African composite batholith of the Adrar des Iforas (Mali): a review. *Geological Journal*, 22, 185–211.

Liégeois, J.P., Benhallou, A., Azzouni-Sekkal, A., Yahiaoui, R., & Bonin, B. (2005). The Hoggar swell and volcanism: Reactivation of the Precambrian Tuareg shield during Alpine convergence and West African Cenozoic volcanism. In: Foulger, G.R., Natland, J.H., Presnall, D.C., & Anderson, D.L. (Eds.), *Plates, Plumes and Paradigms. Geological Society of America Special Paper*, 388, 379–400.

Longley, P.A., Goodchild, M.F., Maguire, D.J., & Rhind, D.W. (2005). *Geographical Information Systems and Science.* Wiley.

Meriem, D. (1987). Données nouvelles sur les granitoïdes du Pharusien de la région de Timgaouine. *Pétrologie et évolution géodynamique.* Thèse de Doctorat, Université Nancy I, 198 p.

Moulahoum, O. (1988). Dualité du magmatisme d’âge pan-africain : aspects structuraux et

péetrologiques des granites subalcalins et alumineux de la région de Tamanrasset (Hoggar Central, Algérie). Thèse de Doctorat Ingénieur, Université Nancy I, 145 p.

Ouzzegane, K. (1981). Le métamorphisme polyphasé granulitique de la région de Tamanrasset (Hoggar central). Thèse de 3^e cycle, Université Paris VII, 171

Picciotto, E., Ledent, D., & La Y, C. (1965). Géochronologie de quelques roches du socle cristallophyllien du Hoggar (Sahara central). Actes du 151^e Colloque International de Géochronologie Absolue, CNRS, Paris, pp. 277–289.

Sannikov et al, (1979). Prospection bachir par SONREM.

Sautter, V. (1986). Les éclogites de l'Aleksod (Sud Algérien) : des témoins in situ d'une collision continentale. *Journal of African Earth Sciences*, 5, 345–357.

Vialetie, Y., & Vitel, G. (1981). Geochronological data on the Amsinassene–Tefedest block (Central Hoggar) and evidence for its polycyclic evolution. *Precambrian Research*, 9, 241–254.

Vitel, G. (1977). Le cycle magmatique polyphasé d'âge pharusien du Hoggar Central (Sahara Central). *Bulletin de la Société Géologique de France*, XIX(5), 1005–1010.

Vitel, G. (1979). La région Tefedest–Atakor du Hoggar Central (Sahara). Évolution d'un complexe granulitique précambrien. Thèse d'État, Université Paris VII, 324 p.

Tomlinson, R. F. (2007). Thinking about GIS: Geographic Information System Planning for Managers. ESRI Press.

Wang, H., et al. (2002). Data integration using weights of evidence method: application in mapping mineral potential resources. ISPRS Commission IV, Working Group IV/7.

Zeghouane, H. (2006) Pétrographie géochimie et géochronologie du massif granitique d'Arirer Hoggar oriental Algérie ; Mémoire de magister USTHB

Zeghouane, H. (2016). Apport de la méthode des poids de l'évidence pour la géologie prévisionnelle des métaux rares dans le Hoggar, Algérie. Thèse de doctorat.