

Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

جامعة مولود معمري +.O.V.:Σ+ E:II:V .+ E.E.O

Université Mouloud Mammeri de Tizi-Ouzou

Faculté des Sciences Biologiques et des sciences Agronomiques

Département des Sciences Géologiques



## **MEMOIRE**

Présenté pour l'obtention du diplôme de  
**MASTER EN SCIENCES DE LA TERRE ET DE L'UNIVERS**

**Option : Ressources Minérales, Géomatériaux et Environnement**

Par : Guemraoui Ahmed Et Seddiki Salim

Thème :

**Modélisation géologique par la méthode des poids de l'évidence  
pour la cartographie du potentiel aurifère de la région de Tin Felki,  
Hoggar Centro-occidental, ALGERIE**

Encadré par : M. Zeghouane

Soutenu publiquement le 30/06/2025 devant le Jury composé de :

Mme.Izri. D	Maitre assistante A à l'UMMTO	Présidente
Mme. Dendane .M	Maitre assistante A à UMMTO	Examinatrice
M. Zeghouane .H	Maitre conférence B à UMMTO	Promoteur

2024/2025

## Remerciements

*Je tiens tout d'abord à exprimer ma profonde gratitude à Monsieur Zeghouane Haucine, mon encadreur, pour sa disponibilité, ses précieux conseils et son accompagnement tout au long de la réalisation de ce mémoire.*

*Je remercie également tous les enseignants sérieux du département de géologie pour la qualité de l'enseignement qu'ils m'ont dispensé et pour leur dévouement tout au long de mon parcours universitaire.*

*Je suis infiniment reconnaissant envers Yemma, mon père et mes frères pour leur soutien moral, leurs encouragements constants et leur présence bienveillante, qui ont été pour moi une source de motivation inestimable.*

*Mes remerciements s'adressent aussi à mes camarades de promotion : Monaim, Hasni, Lydia, Mouad, Bilal, ainsi qu'à l'ensemble de mes camarades de classe, pour leur bonne humeur, leur solidarité et les moments agréables partagés durant ces années d'études.*

*Enfin, à toutes les personnes qui, de près ou de loin, ont contribué à la réalisation de ce travail, je témoigne ici ma sincère reconnaissance.*

**GUEMRAOUI AHMED**

# SOMMAIRE

## GENERALITES

1. Introduction et méthodologie
2. But et objectif du travail.....
3. Situation géographique, climat, faune, et flore.....
4. Méthodologie

## Chapitre 1. Géologie régionale du Hoggar

- 1 Introduction.....
2. Subdivisions Structurales du Hoggar
  - 2.2.1. La Première Subdivision.
  - 2.2.2. La Seconde Subdivision

## Chapitre 2. Géologie de la région d'étude

1. Introduction.....
2. Stratigraphie.....
  - 2.1. Ensemble métamorphique inférieur .....
  - 2.2. Ensemble métamorphique supérieur .....
3. Magmatisme.....
4. Tectonique.....
5. Minéralisation.....

## Chapitre 3. Le système d'informations géographiques

1. Introduction .....
2. Le mode de représentation spatiale des données.....

2.1. Données raster.....	
2.2. Données vectorielles.....	
3. Les domaines d'application.....	
4. Les fonctionnalités des SIG.....	
4.1. Acquisition des données.....	
4.2. Digitalisation (vectorisation).....	
4.3. Structuration et modélisation des données.....	
4.4. Traitement des données.....	
4.5. Gestion des données.....	
5. Géoréférencement.....	
5.1. Définition.....	
5.2. Première étape : Définition de l'espace de travail.....	
5.3. Deuxième étape : Le système de projection.....	
5.4. Troisième étape : la projection des données.....	
6. Les avantages du SIG pour réaliser une analyse spatiale	
7. Exemples des logiciels SIG.....	
8. Présentation du logiciel ArcGIS.....	
8.1. Introduction.....	
8.2. Présentation de l'interface ArcMap.....	
8.3. Présentation de l'interface ArcCatalog	
8.4. ArcToolbox.....	

## **Chapitre 4. SIG Appliqué sur la région d'étude (tin felki)**

1. Introduction	
2. Les étapes suivies, de début jusqu'au géoréférencement de la carte.	
2.1. Insertion de la carte (image raster) vers ArcMap	
2.2. Attribution de La référence spatiale	
2.3. Géoréférencement de la carte	
3. La vectorisation des différentes formations géologiques	
3.1. Vectorisation des Failles	
3.2. Vectorisation des formations géologiques	

## **Chapitre 5. Modélisation géologique**

1. Introduction.....
2. la description de la méthode
  - 2.1. La probabilité antérieure
  - 2.2. La probabilité postérieure
    - 2.2.1. Introduction de thème prédictif (B)
    - 2.2.2. Introduction de thème prédictif (E)
  - 2.3. Calcul des paramètres statistiques WOFE
3. la modélisation géomatique prédictif (feuille de tin felki)
  - 3.1. Édification d'un SIG
  - 3.2. Préparation de données à l'analyse
  - 3.3. Analyse spatiale et création de cartes binaires

## **Chapitre 06 : Conclusions générales et recommandation**

## Liste des figures

- Figure 01** : Situation géographique du bouclier Touareg (en rouge) et du Hoggar (en vert).
- Figure 02** : Carte géologique simplifiée du bouclier Touareg (Liégeois et al., 2003).
- Figure 03** : Carte des principales subdivisions des domaines structuraux du Hoggar (d'après Caby et al., 1981).
- Figure 04** : Le cycle des SIG.
- Figure 05** : Représentation des pixels dans une image raster.
- Figure 06** : Exemples de données raster.
- Figure 07** : Exemples de données vecteur.
- Figure 08** : Scannérisation.
- Figure 09** : Interface d'ArcMap.
- Figure 10** : Interface d'ArcCatalog.
- Figure 11** : Interface d'ArcToolBox.
- Figure 12** : Présentation d'interface d'ArcCatalog montrant l'icône de connexion à un dossier.
- Figure 13** : Interface montrant les disques et dossiers où l'utilisateur cherche l'emplacement de la carte scannée.
- Figure 14** : Chemin de la carte de Tin Felki vers l'interface des propriétés.
- Figure 15** : Modification de la référence spatiale dans les propriétés du jeu de données raster.
- Figure 16** : Carte géoréférencée sous ArcMap.
- Figure 17** : Différentes failles vectorisées de la feuille de Tin Felki.
- Figure 18** : Vectorisation d'une couche géologique de couverture dans la région de Tin Felki sous ArcMap.
- Figure 19** : Résultat de la vectorisation des couches magmatiques dans la région de Tin Felki sous ArcMap.
- Figure 20** : Processus de vectorisation appliqué à une unité métamorphique dans la région de Tin Felki sous ArcMap.
- Figure 21** : Carte géologique vecteur simplifiée de Tin Felki.
- Figure 22** : Principe bayésien de combinaisons prédictives.
- Figure 23** : Sens physique de la probabilité antérieure.
- Figure 24** : Probabilité postérieure de D étant donné la présence de l'évidence B.
- Figure 25** : Probabilité postérieure de D sachant la présence de l'évidence E.
- Figure 26** : Couverture.
- Figure 27** : Faille.
- Figure 28** : Granite de Taourirth.
- Figure 29** : Granite panafricain.
- Figure 30** : Diorite et gabbro.
- Figure 31** : NP supérieur.
- Figure 32** : NP inférieur.
- Figure 33** : Formation de plateforme.
- Figure 34** : Série Aleksod (GS).
- Figure 35** : Série Arechchoum (GM).
- Figure 36** : Carte lithologique.
- Figure 37** : Carte tectonique.
- Figure 38** : Carte des anomalies géochimiques.
- Figure 39** : Création de la carte binaire « Proximité de faille ».
- Figure 40** : Création de la carte binaire « Densité de faille ».

**Figure 41** : Création de la carte binaire « Anomalies géochimiques ».

**Figure 42** : Carte du potentiel minéral.

## **Résumé**

Ce travail vise à optimiser les efforts d'exploration aurifère dans la région de Tin Felki (11 000 km<sup>2</sup>) au Hoggar centro-occidental (Algérie), en réduisant la surface à prospector grâce à la méthode des Poids de l'Évidence (Weights of Evidence - WofE) intégrée dans un Système d'Information Géographique (SIG).

Après une étude géologique détaillée de la région et la construction d'une base de données sous ArcGIS, plusieurs thèmes prédictifs (lithologie, failles, indices connus...) ont été intégrés et convertis en cartes binaires. La méthode WofE a ensuite permis de pondérer ces thèmes selon leur influence sur la présence d'or, afin d'établir une carte prédictive du potentiel aurifère.

Les résultats obtenus ont permis de cibler avec précision des zones à fort potentiel, réduisant ainsi considérablement la superficie à explorer. Cette démarche montre l'intérêt des techniques de modélisation spatiale couplées aux SIG pour améliorer l'efficacité et la rentabilité des campagnes d'exploration minière.

## **Abstract**

This study seeks to optimize gold exploration efforts in the Tin Felki region (11 000 km<sup>2</sup>) within the central-western Hoggar (Algeria) by minimizing the surface area to be prospected through the application of the Weights of Evidence (WofE) method, integrated within a Geographic Information System (GIS).

After conducting a detailed geological study of the region and constructing a spatial database in ArcGIS, several predictive evidential themes (lithology, fault systems, known mineral occurrences, etc.) were integrated and converted into binary maps. The WofE method was then applied to assign statistical weights to these evidential factors according to their influence on the presence of gold, in order to establish a predictive gold potential map.

The results obtained made it possible to accurately delineate high-potential areas, thereby considerably reducing the total surface area requiring field exploration. This approach demonstrates the value of combining spatial predictive modeling techniques with GIS tools to improve the efficiency and profitability of mineral exploration campaigns.



***GENERALITES***

# Généralités

## 1-Introduction et méthodologie :

Dans le contexte actuel où les méthodes classiques d'exploration minière s'avèrent coûteuses et longues, l'intégration des technologies géomatiques et des méthodes statistiques prédictives offre de nouvelles perspectives pour la recherche minière. La région de Tin Felki, couvrant environ 11 000 km<sup>2</sup> au sein du Hoggar centro-occidental en Algérie, constitue une zone géologiquement favorable à la minéralisation aurifère. Toutefois, la superficie importante et l'absence d'exploration détaillée sur l'ensemble du territoire imposent de cibler les zones prioritaires à fort potentiel.

Pour répondre à cette problématique, ce travail repose sur l'application de la méthode des Poids de l'Évidence (Weights of Evidence - WofE), combinée à l'utilisation d'un Système d'Information Géographique (SIG). La méthodologie adoptée a consisté à recueillir, géoréférencer et vectoriser des données géologiques (formations, failles, indices d'or existants), avant de construire une base de données spatiale à l'aide du logiciel ArcGIS.

Les différentes formations géologiques et structures tectoniques ont été converties en thèmes prédictifs sous forme de cartes binaires. Ensuite, la méthode WofE a permis d'évaluer statistiquement la relation entre ces facteurs et la présence connue d'or à travers le calcul de poids positifs et négatifs. L'intégration de ces informations a abouti à la génération d'une carte prédictive du potentiel aurifère, mettant en évidence les secteurs à explorer en priorité, réduisant ainsi considérablement la surface totale d'exploration.

## 2. but et Objectif de travail

L'objectif principal de ce travail est de réduire au maximum la superficie à explorer pour l'or dans la feuille de Tin Felki, en identifiant les zones à fort potentiel aurifère grâce à une approche de modélisation géologique prédictive. Cette démarche s'appuie sur l'intégration de données géoscientifiques dans un Système d'Information Géographique (SIG) et sur l'application de la méthode des Poids de l'Évidence (WofE). Le but est de produire une carte de prédictivité permettant d'orienter efficacement les futures campagnes de prospection et d'optimiser les ressources humaines et financières engagées.

## 3. Situation géographique, Climat, faune et flore.

Le massif antécambrien de l'Ahaggar s'étend entre 1° et 11° de longitude Est, et entre 20° et 27° degrés de latitude nord. Il passe en continuité SW par l'Adrar des Iforas, et au SE par l'Air (Niger) qui n'en est séparé que par une étroite bande de grès paléozoïques. Au N et au S, ce massif est limité par des dépôts paléozoïques, par contre à l'Ouest, les regs mésozoïques de Tanezrouft viennent le recouvrir insensiblement.

# Généralités



*Figure 01 : Situation géographique de bouclier touareg(rouge) et de Hoggar (vert)*

Cette région se distingue par un climat désertique, aride et sec, marqué par d'importantes variations de température. L'été y est particulièrement chaud, avec des températures pouvant atteindre 45°C à l'ombre, tandis que l'hiver reste modérément tempéré, avec des températures variant de 15°C à 25°C en journée et pouvant descendre jusqu'à 0°C durant la nuit.

Les précipitations atmosphériques sont généralement rares, mais lorsqu'elles surviennent, elles peuvent être violentes et dévastatrices, notamment en raison de l'absence quasi totale de végétation.

La faune du Hoggar, typique des milieux désertiques, comprend principalement des dromadaires, antilopes, gazelles et de rares mouflons, ainsi que des gerboises, scorpions, vipères, fennecs et hyènes.

La flore, quant à elle, reste peu abondante et se développe principalement dans les lits d'oueds et à proximité des rares points d'eau permanents. Parmi les espèces les plus fréquentes, on trouve le tamaris, l'acacia, des graminées sauvages, le peuplier et l'armoïse.

Le Hoggar est reconnu comme l'un des plus beaux sites naturels du monde et constitue une destination touristique de premier choix. On y découvre des dunes de sable doré, des Guel-tas, de superbes méandres et canyons creusés en profondeur dans les lits d'oueds à travers les Tassilis, ainsi que des levers et couchers de soleil d'une beauté inégalable.

**4-La société touarègue** La société touarègue est structurée autour d'un sage suprême appelé l'Amenokal. Chaque tribu dispose de son propre chef, désigné sous le nom d'Amrar. Ce sont les chefs de tribus, appelés Imrarène, qui procèdent à l'élection de l'Amenokal.

# Généralités

La langue des Touaregs, connue sous le nom d'Imouhar, est une branche dérivée du berbère et se nomme tamasheq. Quant à leur écriture, elle porte le nom de Tifinagh. Chez les Touaregs, les traditions se transmettent principalement de manière orale.

(Source : site Internet de l'O.N. T, Algérie)

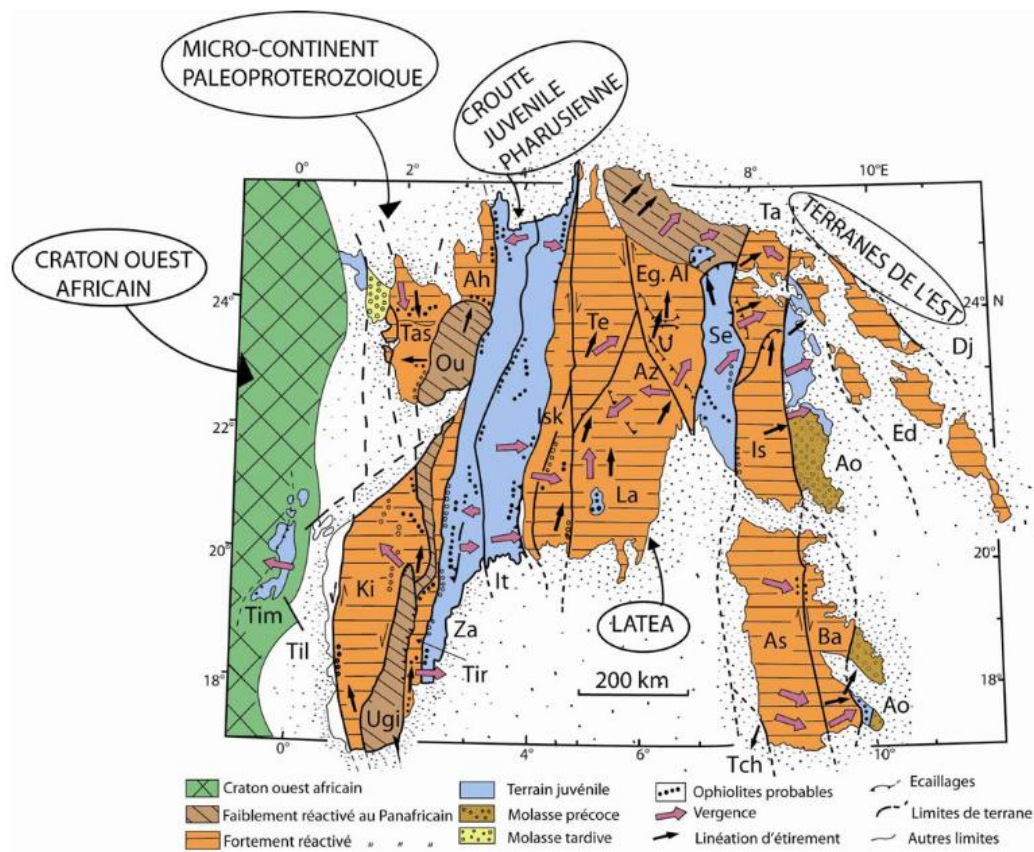


# ***CHAPITRE 01: GEOLOGIE DE HOGGAR***

# CHAPITRE 1 : GEOLOGIE DE HOGGAR

## 1.Introduction

Le Hoggar constitue la partie centrale du bouclier Touareg couvrant environ 550 000 km<sup>2</sup> et fait partie intégrante de la chaîne panafricaine trans-saharienne, qui se prolonge au sud-ouest par l'Adrar des Iforas (Mali) et au sud par l'Aïr (Niger). Ce vaste ensemble géologique se caractérise par la présence de formations Paléo-protérozoïques, représentées notamment par la série d'Arechchoum et le socle éburnéen, ainsi que par des formations Néoprotérozoïques comprenant la série à stromatolites, la série volcanosédimentaire, la série de plateforme et la série verte. Ces formations sont recouvertes en discordance par des séries molassiques et des dépôts phanérozoïques. La couverture tassilienne, en position discordante, est constituée de grès ordoviciens qui ne subsistent aujourd'hui que dans les parties nord et sud de la région. Ce décapage a été provoqué, à la fin du Jurassique, par une phase distensive associée à l'ouverture de l'Atlantique, mais également par un bombement lithosphérique à grand rayon de courbure (Girod, 1976 ; Dautria, 1988). Ce bombement s'est accompagné d'une intense activité volcanique, de type « point chaud », à caractère tholéitique à alcalin, datée du Cénozoïque au Quaternaire.



# CHAPITRE 1 : GEOLOGIE DE HOGGAR

## 2. Subdivision structurale du Hoggar

La structure du Hoggar est marquée par la présence de grands cisaillements subméridiens d'ordre lithosphérique, situés aux méridiens 4°50 et 8°30, ainsi que par des décrochements majeurs, dextres orientés NNE et senestres orientés NNO. Cette configuration confère au massif une structure morcelée, dont l'interprétation a progressivement évolué avec le temps. À ce jour, trois grandes subdivisions structurales ont été proposées.

### 2.1. La Première Subdivision (M. Lelubre, 1952) :

M. Lelubre (1952) distingue dans le Hoggar deux cycles orogéniques majeurs, séparés par une discordance nette et importante :

**A -Le Cycle Suggarien**, situé à la base, comprend deux ensembles gneissiques superposés, à caractère polycyclique et fortement métamorphique, d'âge Paléoprotérozoïque.

-L'ensemble gneissique inférieur est dominé par des orthogneiss et quelques rares méta-sédiments (**correspondant à la série d'Arechchoum**).

-L'ensemble gneissique supérieur, quant à lui, est à dominance méta-sédimentaire et correspond à la série d'Egéré ou **d'Aleksod**.

**B-Le Cycle Pharusien**, positionné au sommet, se compose de deux ensembles volcanosédimentaires, cette fois monocycliques et moins métamorphiques, d'âge Néoprotérozoïque.

Sur sa carte géologique établie à l'échelle 1/500 000, M. Lelubre distingue deux grands blocs géologiques séparés par l'accident 4°50 :

- **Le bloc Suggarien**, localisé à l'Est.
- **Le bloc Pharusien**, situé à l'Ouest.

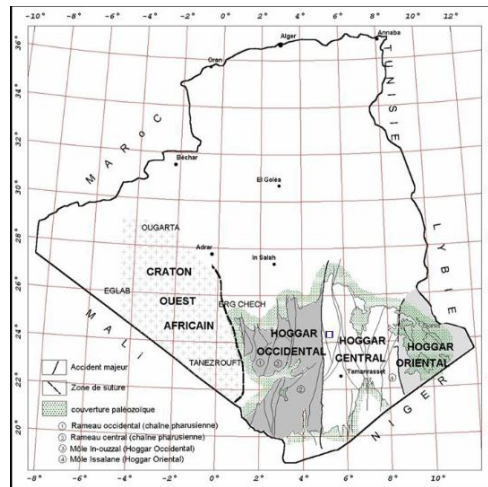
### 2.2. La Seconde Subdivision (Bertrand et Caby 1978) :

Les nombreux travaux menés sur l'ensemble du Bouclier Touareg (1967-1978) ont permis d'établir une véritable subdivision lithostratigraphique et structurale bien illustrée, toujours d'actualité. Le Hoggar est subdivisé en trois grands domaines structuraux séparés par des accidents majeurs 4°50 et 8°30(Fig.8).

- **Hoggar Oriental** : Dj (Djanet), Ed (Edembo), Ao (Aouzegueur).
- **Hoggar Central** : As-Is (Assodé-Issalane), Se (Serouenet), Eg-Al (Egéré-Aleksod), Az (Azou-n-Fad), Te (Tefedest), La (Laouni).

# CHAPITRE 1 : GEOLOGIE DE HOGGAR

➤ **Hoggar Occidental** : Isk (Iskel), Te (In Tedeini), Za (Tin Zaoutine), Tir (Tirek), Ou (In Ouzzal), Ugi (Iforas), Tas (Tassendjanet).



*Figure3. Carte des Principales Subdivisions des Domaines Structuraux du Hoggar (d'après Caby et al, 1981)*

## ➤ 2.2.1 Le Hoggar occidental.

Il est délimité à l'ouest par le craton ouest-africain et à l'est par l'accident tectonique de  $4^{\circ}50'$ . Ce domaine est lui-même subdivisé en deux rameaux, oriental et occidental, séparés par le môle d'In-Ouzzal (ou terrain d'In-Ouzzal), constitué de matériaux d'âge archéen qui ont été structurés et métamorphisés lors de l'Eburéen. Cet ensemble forme un vaste domaine où affleurent principalement des formations volcano-sédimentaires.

a) Le rameau oriental : comprend Quatre principales séries d'âges néoprotozoïques se distinguent par leur lithologie et leur chronologie relative. De la plus ancienne à la plus récente, on trouve : la série de plateforme à stromatolites, la série volcano-sédimentaire, la série détritique, puis la série volcan gêné (BOUKHALFA L., 1987). Ces séries sont traversées par des intrusions magmatiques variées, qui constituent la majeure partie des affleurements dans cette région. Par ailleurs, plusieurs lambeaux de roches ultramafiques serpentinisées, généralement riches en chromite, sont associés aux niveaux inférieurs des formations volcano-sédimentaires. Les formations mésoprotozoïques forment une ceinture orientée nord-sud, localisée en bordure du môle In Ozzal. Dans le rameau oriental, quatre terranes ont été identifiés : Iskél, In Tedeini, Tin Zaouatene et Tirek.

b) Le rameau occidental comprend :

# CHAPITRE 1 : GEOLOGIE DE HOGGAR

- Des fragments d'un socle gneissique d'âge paléo-protérozoïque, affectés par des intrusions granitiques datées à 2090 Ma.
- La série à stromatolites, présente dans le nord-ouest du Hoggar, d'âge mésoprotérozoïque, métamorphisée dans le faciès amphibolite, comparable à celle du rameau oriental.
- La série volcano-sédimentaire, d'âge néoprotérozoïque, en discordance sur la précédente.

Dans ce rameau, trois terrains orientés nord-sud ont été individualisés : Kidal, Tassendjanet, et Ahnet.

1. **Kidal** : caractérisé par un socle de gneiss paléoprotérozoïques à noyaux granulitiques supposés d'âge archéen (semblable au môle In Ozzal). Ce socle supporte en discordance, d'une part, des séquences supracrustales de plateforme néoprotérozoïque, intrudées par des granitoïdes déformés datés à 695 Ma, et d'autre part, des formations molassiques sous forme de bassins isolés, recoupées par des batholites de granitoïdes calco-alcalins fortement potassiques âgés de 570 à 630 Ma.

2. **Tassendjanet** : composé de gneiss éburnéens, recouverts en discordance par la série à stromatolites (néoprotérozoïque), associée à des lentilles de roches ultrabasiqes serpentinisées, elles-mêmes surmontées par une série volcano-sédimentaire épizonale.

3. **Ahnet** : caractérisé principalement par le développement de quartzites à séricite deltaïques (post-eburnéen) et de rhyolites datées à 1800 Ma, surmontées par la série à stromatolites.

La série molassique (cambrienne) est répartie à travers tout le Hoggar sous forme de bassins isolés, principalement développés au nord-ouest. Elle contient un matériel sédimentaire reflétant le démantèlement des formations avoisinantes, avec plusieurs niveaux de matériel volcanique essentiellement rhyolitique, daté à 520 Ma dans le nord-ouest du Hoggar. Cette série représente l'ultime phase de l'orogénèse panafricaine.

D'un point de vue structural, la sédimentation de cette série a impliqué des rejets d'anciens accidents tectoniques.

## 2.2.2. Le Hoggar central.

Ce domaine est constitué de matériel ancien éburnéen ainsi que de formations protérozoïques inférieur et moyen, qui ont été rajeunis lors de l'orogénèse panafricaine. D'ouest en est, on distingue trois grandes zones structurales :

# CHAPITRE 1 : GEOLOGIE DE HOGGAR

- **La zone Tefedest-Atakor**
- **La zone Egéré-Arefsa**
- **La zone orientale Gour Oumellalen-Tamassint**

## **a) La Zone Tefedest-Atakor :**

Cette zone est délimitée à l'ouest par l'accident des 4°50 et à l'est par celui d'Amguid-Arefsa. Elle comprend la chaîne granitique de la Tefedest et la pénéplaine gneissique de l'Archechoum, qui s'étend au sud du massif volcanique de l'Atakor (Girod, 1971). Deux ensembles lithostratigraphiques y sont définis:

- **Un complexe gneissique de l'Archechoum**, caractérisé par une discordance entre un groupe de gneiss quartzo-feldspathiques et un groupe de méta-sédiments (Barbey et al., 1986). Ce complexe est daté de l'orogénèse panafricaine.

- **Un groupe volcano-sédimentaires**, dont l'extension est restreinte, correspondant à la « série de Déhine », pour laquelle un âge Protérozoïque moyen a été proposé.

## **b) La Zone Egéré-Arefsa :** Cette zone est constituée de deux principales séries :

- **La série de l'Archechoum**, essentiellement composée de gneiss :

- Des gneiss rubanés datés de 3200 Ma
- Des gneiss ocellés datés de 2050 Ma
- Et des méta-sédiments (Bertrand et Lasserre, 1972).

- **La série de l'Aleksod**, formée de méta-sédiments et d'amphibolites. Dans cette série, Sautter (1985) a mis en évidence, en 1985, des lentilles d'éclogites. L'âge de cette série a été établi à  $2131 \pm 12$  Ma pour les sédiments et à  $609 \pm 17$  Ma pour l'événement tectono-métamorphique panafricain (Sautter, 1985).

## • **c) La Zone Orientale Oumellalen-Tamassint :**

Cette zone est constituée de gneiss, de quartzites et de micaschistes, et elle regroupe trois séries lithostratigraphiques distinctes :

- **La série rouge** : Elle est composée de gneiss rubanés avec quelques intercalations de marbres et de quartzites. Cette série a été datée à  $3477 \pm 90$  Ma (Bertrand et al., 1968).

# CHAPITRE 1 : GEOLOGIE DE HOGGAR

- **La série des Gour Oumellalen** : Elle repose en **discordance sur la série rouge** et renferme des **gneiss à biotite** ainsi que des **faciès granulitiques** dont l'âge est estimé à environ **2000 Ma**.

- **La série Toukmatine** : Elle est constituée d'un ensemble de micaschistes, contenant du mica et du grenat.

## 2.2.3 Le Hoggar Oriental.

Il est caractérisé par la chaîne « Tiririnienne » d'âge panafricain tardif ; à caractère linéaire encadrée à l'Est et à l'Ouest par deux socles plus anciens et structuralement différents l'un de l'autre. Dans ce compartiment, trois sous domaines peuvent être distingués :

- a) **La chaîne Tiririnienne** : Edifiée au Panafricain tardif, elle est séparée du socle par une discontinuité majeure traduisant un dépôt sur une surface d'érosion qui montre des roches métamorphiques et magmatiques très diverses, cette zone est constituée d'arkoses, de conglomérats et de calcaires à Stromatolithes.

- b) **La zone péritiririnienne (Tafassasset – Djanet)** : Elle est constituée de larges batholites de granites calco-alcalins, de dépôts de type Flysch, de roches de type calco-silicatées ainsi que de roches volcaniques et plutoniques pré-tectoniques avec des granites, des gneiss et des roches ultrabasiqes.

- c) **Le môle Issalane** : Situé à l'Ouest, il est constitué essentiellement de granites et de gneiss ainsi que de formations méta sédimentaires (Quartzites, marbres, pyélites et roches calco-silicatées



**CHAPITRE 2 : GEOLOGIE DE LA  
REGION DE TIN FELKI**

## CHAPITRE 2 : GEOLOGIE DE LA REGION DE TIN FELKI

### 1. Introduction.

La feuille TIN - FELKI étant le prolongement naturel au Nord du rameau central de la chaîne pharusienne de massive de Hoggar, délimitée approximativement entre les longitudes 5° et 6° Est et les latitudes 23° et 24° Nord, représente une superficie de près de 11 000 km<sup>2</sup>.

La feuille de Tin Felki se localise à environ 130 km au nord de la ville de Tamanrasset, capitale économique du Hoggar, et s'étend au sud de la région montagneuse de l'Atakor et à l'est du secteur d'Iskel. Cette zone se caractérise par un relief généralement accidenté, dominé par des formations volcaniques et des plateaux d'altitude moyenne à élever, où les points culminants dépassent parfois 1700 m.

Géologiquement, la région de Tin Felki est marquée par la prédominance de terrains précambriens, incluant des granitoïdes calco-alcalins, des formations volcano-sédimentaires et des terrains métamorphiques, témoins des grands événements tectono-métamorphiques panafricains. Un dense réseau d'oueds secs peu profonds sillonne les plateaux et les massifs, contribuant à l'aspect morcelé du relief. (BLINNIKOV. V et al, 1991)

Le cadre géologique particulier de cette feuille, ainsi que sa position dans l'axe des grands accidents tectoniques du Hoggar central, confèrent à cette zone un intérêt certain pour l'étude de la structuration panafricaine et l'exploration minière, notamment pour les indices aurifères connus dans le secteur.

### 2. Stratigraphie.

La classification stratigraphique utilisée dans la région repose principalement sur des critères lithologiques et métamorphiques. Deux ensembles clairement distincts caractérisent le périmètre d'étude considéré dans nos travaux. Ces deux ensembles, juxtaposés et mis en contact par la faille centrale 4°50', correspondent à des niveaux structuraux différents et sont d'âges distincts. Les formations de ces ensembles sont classées et regroupées en séries et assises, sans tenir compte du sens stratigraphique des unités.

#### 2.1. Ensemble métamorphique inférieur.

Les Formations du Protérozoïque inférieur d'après la classification en vigueur " Inventaire et prospective des ressources minérales du Hoggar " Alger 1977, avec un âge absolu compris entre 2000 et 2700 M.A. Les séries types identifiées sont :

- **Série de TASSENDJANET** (R. CABY, 1967),
- **Série de l'ARECHCHOUM,**

## CHAPITRE 2 : GEOLOGIE DE LA REGION DE TIN FELKI

- **Série de GOUR OUMELALEN** (L. LATOUCHE, 1972).

Cet ensemble, domaine du Hoggar central polycyclique présente des affleurements monotones en bancs subméridiens avec un relief très peu accusé, avec un dénivelé de 100 m au maximum.

Cet ensemble est intrusé par deux (02) plutons granitiques circonscrits longeant la faille centrale 4°50'.

Il est aussi sillonné par des dykes de roches aplitiques de direction assez variable, les dykes méridiens sont peu nombreux, tandis que ceux de direction NE - SW prédominent. On note aussi quelques dykes de direction latitudinales, alors que les aplites de direction NW - SE sont pratiquement absentes.

En certaines zones, la densité des dykes est très importante ; cette densité de dykes coïncide avec des failles importantes de direction NE - SW qui pourraient laisser supposer une ébauche de compartimentation NE car ces failles NE - SW laissent apparaître une différence dans la lithologie de cet ensemble.

Cet ensemble n'est pas subdivisé en séries car il n'a pas été échantillonné par des lames minces représentatives pour chaque unité. La partie centrale, située entre la faille NE - SW, est représentée par des gneiss passant progressivement à des gneiss granitoïdes homogènes. Au-delà de ces cassures, la composition lithologique comprend des gneiss oreilles, des amphibolites, ainsi que des formations Métasédimentaires, soient des quartzites, cipolins ou marbres et schistes cristallins.

La zone de mylonite le long de la faille 4 50' étant absente pour la région des gneiss granitoïde. Et l'existence des massifs granitiques laissent supposer une différence lithologique dans cet ensemble.

Lithologiquement cet ensemble est constitué par :

**a). Gneiss granitoïdes** : ce sont les affleurements qui caractérisent la partie centrale de l'ensemble. A première vue ils présentent l'aspect d'une roche ignée soumise à une cataclase.

**B). Gneiss oreilles** : Ce sont des affleurements restreints, "en paquets" de 2.8 m d'épaisseur parmi les gneiss à amphiboles et les amphibolites. Sous le Microscope, il présente une structure lepidoporphyrogranoblastique. IL est constitué par le quartz en granoblastes xénomorphe à extinction roulante, le plus souvent à contours flous fortement engrenés avec les minéraux avoisinants. Par ailleurs il constitue à lui seul des lits de 1-2 mm d'épaisseur.

**c). Amphibolites** : C'est une roche sombre, mesocrate, de couleur vert sombre. Elle représente la presque totale superficie de l'ensemble stratigraphique au Nord et au Sud. Elle se débite en lames dans un relief très peu accusé.

## CHAPITRE 2 : GEOLOGIE DE LA REGION DE TIN FELKI

**d). Schistes cristallins** : Au Sud de la feuille, ces roches forment des niveaux de petites étendues affleurant avec des amphibolites, des niveaux de quartzites et des lentilles de marbres.

C'est une roche schisteuse a structure lepidogranoblastique composée à 45 % de quartz xénomorphe a extinction onduleuse, et il présente aussi une légère recristallisation.

**e). Quartzites** : Ce sont en général des niveaux assez rares qui ont été recoupés au Nord et au Sud de l'ensemble. Assez restreints en épaisseur (1 à 2 m environ), ces niveaux marquent nettement la direction et les zones de plissement des structures

**f). Marbres** : Ce sont de petites lentilles communes a tout l'ensemble mais tout de même avec une fréquence notable parmi les amphibolites. Ce sont de petits affleurements de 30-50 m d'extention et d'épaisseur 4-5 m, rarement 15-20 m. La couleur est variée, mais la teinte brun-ocre prédomine. Ces marbres sont sillonnés de petits filonnets de quartz boudine d'épaisseur 2-4 cm.

### 2.2. Ensemble métamorphique supérieur :

Ce deuxième ensemble affleurant dans le périmètre d'étude constitue en fait une partie du rameau central de la chaîne Pharusienne qui s'étend sur une grande superficie limitée à l'Est par la faille 4°50' et à l'Ouest par la mole IN OUZZAL. La cartographie du périmètre d'étude ne permet de différencier les formations selon les âges définis comme pharusien Pr3 et Pr4. On prendra comme exemple le niveau de conglomérat longeant le faciès gresopélitique à l'Est et/ou à l'Ouest qui était considéré comme étant le terme antérieur de ce faciès constitue en fait le sommet de tout l'ensemble. Ce niveau de conglomérats qui renferme des galets d'origine plutonique mimant les granodiorites et diorites quartzitiques du complexe magmatique AFEDAFEDA, des galets d'origine volcaniques (basiques, intermédiaires et acides), contient en sus des galets de grès, tuffogrès, carbonates provenant du démantèlement probable du faciès dit grèsopélitique.

**A. Série inférieure** : Cette série comprend deux assises spatialement isolées l'une de l'autre. Ces assises peuvent être équivalentes (bassins isolés ou la sédimentation se fait dans un régime de plate-forme avec des séquences volcaniques et/ou plutonique d'ampleur inégale pour chaque bassin).

Assise inférieure : Elle affleure sous forme de lambeau conservé dans les diorites et diorites quartzitiques au Nord et à l'Est du massif de IMEHELLATENE. Cette assise dont la coupe la plus complète trouve son extension plus au Nord, dans les limites de la feuille

## CHAPITRE 2 : GEOLOGIE DE LA REGION DE TIN FELKI

TESNOU. Elle est nommée " Série dioritoïde " par Y. SINTCHOUK, (1984) et dont la lithologie a été donnée par V. MAKHOV, 1972 (rapport SONAREM. H.134).

Les roches affleurant dans le périmètre d'étude dessinent une structure plissée d'axe méridien à NNW (340-350). Le pendage est abrupt, de l'ordre de 60-70°, à l'Est de l'assise, et, il est nettement plus doux à l'Ouest, soit 30-40°.

La lithologie est assez variée, mais la coupe est essentiellement composée d'amphibolites, soit 70-80 % du volume de l'assise. Le reste est formé de schistes, de petites lentilles de marbre et de petites passées de quartzites. Toute l'assise est sillonnée de trainées de roches ultrabasiques serpentines d'envergures réduites et de fréquence relativement importante.

Amphibolite : Généralement c'est une roche massive, mésocrates, de teinte Vert-sombre, très souvent litée, parfois ouillée bancs puissants injectés par des granites – granodiorites sills selon la direction des amphibolites.

Elles font état d'un méta-gabbro à texture orientée. En affleurement, c'est la même " amphibolite " litée ou oreillée.

Schistes à chlorite : Ce sont des passées de très faible épaisseur (d'ordre décimétrique à 1 m au maximum) qui apparaissent dans la partie orientale de l'assise avec les quartzites cipolins...

Skarn (à épidote et grenat) : Ce sont des petits niveaux de roches Carbonatées skarnifiées par le plutonisme granitique avoisinant. De teinte blanches, grises ou rougeâtres, ces niveaux s'étendent sur 50 à 80 m avec une épaisseur de 3 - 5 m, parfois 10-15 m, dans la partie orientale de l'assise.

Quartzite : Elle, se présente sous forme de niveau très mal exprimé, à l'Est dans la partie orientale de l'assise ; l'épaisseur de ce niveau discontinu atteint 2 m au maximum, mais il est présent tout le long de l'affleurement -l'assise.

L'ensemble de l'assise de part, sa lithologie particulière (amphibole - schiste à chlorite - roches carbonatées skarnifiées - quartzites) et par le degré de métamorphisme assez prononcé facies amphibolitiques, présente l'aspect d'une assise relativement ancienne, et, c'est ce qui a motivé son positionnement dans la colonne stratigraphique.

Assise supérieure : Spatialement, cette assise se développe le long de la faille centrale 4 50'. Au Nord du pluton granitique jeune de TEGORAK, elle se présente en forme de croissant nettement dessiné par les quartzites et carbonates (marbres). Son extension septentrionale

## CHAPITRE 2 : GEOLOGIE DE LA REGION DE TIN FELKI

s'exprime sous forme d'un affleurement longiligne de 30 km environ pour une puissance moyenne de 1.5 À 2 km.

Cette assise est remarquable par un niveau de quartzite brun, rubanée ainsi que des niveaux de marbres qui atteignent parfois 500 m de puissance.

Cette assise est recoupée à l'Ouest par l'unité orientale du complexe AFEDAFEDA. Les roches de contact sont matérialisées par des cornéennes et skarn.

La lithologie de cette unité s'exprime comme suite :

Gneiss à grains fins : Ce sont des roches mésocrates, de teinte verdâtre sombre à Les composant des blancs sont représentés par du quartz, des feldspaths potassiques et des plagioclases engrenés les uns dans les autres. Les plagioclases sont séricitisés.

Ces minéraux clairs constituent des niveaux alternes par des lits de biotite en lamelles fines est allongées, a contours irréguliers. La roche est localement traversée par des veinules de quartz.

Schistes amphibolitiques : Ce sont des niveaux de 20-30 m d'épaisseur, de couleur verte, friable et aux touches soyeuses.

Quartzites : Ce sont des niveaux repères qui dessinent à merveille les structures. Au Sud, au niveau de la structure sous forme de croissant, la puissance est supérieure à 70 m. C'est un quartzite rubané, brune et blanche a muscovite, a structure lepidogranoblastique, essentiellement constituée de quartz (70 % environ) granoblastique, xénomorphe a extinction roulante.

Marbres : Les niveaux de marbres sont nombreux. On y rencontre des lentilles restreintes ainsi que de vastes affleurements s'étendant sur plusieurs centaines de mètres. Les teintes sont très variables : blanches, verdâtre, brune, rubanée etc. Cette assise renferme, ou est sillonnée par des dykes ou sills de roches basiques de semi-profondeur métasomatisés. Ce sont des sills et/ou des volcanites complétant la série à quartzites et marbres.

### **B. Série moyenne Volcanodétritique.**

Cette série est subdivisée en trois (03) assises :

#### **B.1. Assise inférieure :**

La distribution spatiale de cette assise s'inscrit comme suit :

## **CHAPITRE 2 : GEOLOGIE DE LA REGION DE TIN FELKI**

- Un affleurement sous forme de bande méridienne discontinue au sein du septum central. C'est une bande étroite de 0.5 à 1 km de large.

- Un affleurement à l'Ouest de la faille 4°13', intrudé par le pluton ADERNIBA représenté par le matériel détritique franc. En cet affleurement, il y a une auréole de métamorphisme progressif de contact (thermométamorphisme).

- Un affleurement au Nord-Ouest de la feuille représentée par des bandes méridiennes d'épaisseur variable (de 0.5-1 km à 5-6 km)

### **B.2. Assise moyenne :**

Cette assise est bien exprimée dans le périmètre d'étude et représente la majorité des formations métamorphiques du Pharusien I. Il ne serait pas exact de l'isoler nettement de l'assise qui la précède, car les deux assises sont intimement liées.

Ces deux assises sont concordantes et la transition est exprimée par le matériel tuffo-détritique ainsi que par des passées détritiques à la base de cette dernière assise.

### **B.3. Assise supérieure :**

Cette assise se développe dans le périmètre d'étude selon les affleurements étroits en structures plissées à axes subméridiens.

Au Nord-Ouest de la feuille, c'est un affleurement longiligne continu de 60 km de long environ pour une largeur de 2 à 4 km. Il longe les assises inférieure et moyenne. Le contact avec ces dernières est exprimé par une faille méridienne.

Ce contact intrusif est confirmé par les dykes basiques (diabase) sillonnant de manière sécante cette assise.

A l'Est, cette assise se matérialise par un affleurement relativement réduit, en structures plissées à axes méridiens intrudées par les granites attaches au complexe AFEDAFEDA.

Plus au Sud, la continuité de l'assise est exprimée par des affleurements étroits (40-50 m) de matériel tuffogènes (brèches volcaniques, agglomérats).

Partout où est exprimée cette assise elle débute, ou comporte, du matériel pyroclastique en niveaux puissants atteignant 1 km d'épaisseur et parfois plus.

### **C. Série supérieure. (Volcanisme basique).**

## CHAPITRE 2 : GEOLOGIE DE LA REGION DE TIN FELKI

Cette série de volume réduit se développe exclusivement au Nord-Ouest du périmètre d'étude sous forme de deux affleurements locaux.

Le premier, au Nord, En affleurement rectiligne de 2 km d'épaisseur, continue au-delà, dans le périmètre de la feuille TESNOU. Sa partie Sud est plus trapue, avec une épaisseur de 5 km au maximum et se termine en biseau sur 11-12 km.

Le second, au Sud, est plus réduit avec une direction (de l'affleurement) de 20-30 N.R. L'épaisseur est de 1 à 1.5 km avec des extrémités renflées. Ce volcanisme possède un trait particulier ; il recouvre les granites et granodiorites de l'ADRAR TINADJAR, en ayant au préalable une discordance des plus nettes - ou elle repose effectivement - sur la série volcano-détritique Pr3. Ce caractère essentiel a motivé le fait que cette formation est considérée comme série à part entière. Ce volcanisme se présente sous forme de structures plissées à axes subméridiens, donc il a subi les contraintes des événements tecno-métamorphiques liés au Panafricain (cycle), avec néanmoins des roches relativement fraîches appréciées sur terrain.

### **D. Série de conglomérats.**

Cette série est ainsi séparée car elle débute, ou marque le début d'une série de démantèlement de ce que l'on pourrait nommer " socle "

La composition du matériel du conglomérat provient du démantèlement de ce "socle" à savoir le matériel de la série volcanodétritique laves basiques, neutres, grès, tuffogrès, dacites, rhyolites, carbonates, marbres...) et les granites granodiorites les intrudant. Notons tout de même que les galets de roches plutoniques ne sont reconnus pour le complexe ADERNIBA (IMEZZARENE - TIMMISSAO).

Le matériel de démantèlement composant cette série provient des roches de socle cité précédemment certaines formations brillent par leur absence, tels les galets des roches ultrabasiques.

La composition du matériel de cette série est fonction de roches qui l'alimentent, pour un terrain où dominent les volcanites acides on a un conglomérat avec des galets de rhyodacites en grande proportion.

A l'Est de la feuille, il y a la présence de lentilles conglomératiques de dimensions réduites au sein du Septum Central, parmi la série volcanodétritique. Les galets les composants sont essentiellement des volcanites et des granites granodiorites.

## **CHAPITRE 2 : GEOLOGIE DE LA REGION DE TIN FELKI**

Plus au Nord, au niveau de l'Adrar TANATARAM, la série est représentée par une lentille de conglomérats et de grès grossiers.

**E. Les dépôts quaternaires :** Ce sont essentiellement les dépôts de recouvrement alluviaux et éoliens.

### **E.1. Dépôts alluviaux (ou oueds)**

Le réseau hydrographique est très important dans la région. Les oueds de grande envergure, tel le TEKOUYAT dont le lit dépasse 1-2 km, pourrait avoir une épaisseur de dépôts appréciables. La puissance maximale des alluvions est de 12 m. Ce sont des terres argileuses de teinte noire (limon), des sables bruns et des sables grossiers gris avec des graviers et galets.

### **E.2. Dépôts éoliens :**

Ces dépôts sont formés essentiellement de sable fin et constituant des dunes de sables.

### **F. Dépôts de cailloutis :**

Ce sont les brèches de pente. Elles se développent généralement à la base des chaînes montagneuses (base du massif TEGORAK). Des dépôts analogues forment les grands plateaux ou regs tel celui correspondant au massif de granite d'ADERNIBA. Ces dépôts ont en général une faible épaisseur.

## **3. Magmatisme**

Les formations ignées occupent environ 70 % de la superficie totale de la feuille de Tin Felki. L'analyse des caractéristiques propres à ces formations a permis d'établir une classification spécifique au périmètre d'étude, en s'appuyant sur les travaux antérieurs réalisés dans la région. Ainsi, en tenant compte des études menées dans les feuilles limitrophes (rapports SONAREM-EREM, thèses universitaires, travaux de géologues français...) et enrichies par les observations de terrain des géologues, une classification chronologique a été proposée selon l'agencement des différentes unités recensées.

- A) Complexe ultrabasique SEKSENE AHNI.
- B) Complexe différencié AFEDAFEDA.
- C) Complexe granitoïde ADERNIBA.
- D) Complexe post - tectonique de TAOURIRT.
- E) Volcanisme anorogénique récent.

### **A). Complexe ultrabasique.**

## CHAPITRE 2 : GEOLOGIE DE LA REGION DE TIN FELKI

Sur terrain, ces formations ultrabasiques sont représentées par des lentilles de puissance métrique (2.5 à 12-15 mm) sous forme d'alignements méridiens à subméridiens. Le fait de classer ces roches sous forme de complexe magmatique isolé est régi par leur individualisation spatiale :

Les formations ultramafiques, sous une forme alignée (lentilles) coïncident inévitablement avec les zones profondément faillées.

Deux (02) alignements principaux jalonnés par ces roches de manière discontinue sont relevés.

La continuité des affleurements plus au Sud prolonge les alignements dans les périmètres des feuilles SILET, TIMGAOUINE et TIN REHROH.

### **B). Complexe AFEDAFEDA.**

C'est le prolongement au Nord des massifs TIN - TIKADIOUIT et TAKLET de SILET. Ce complexe affleure sur plus de 40 % de la superficie totale de la feuille.

Spatialités trois (03) unités le distinguent.

#### **b.1. L'unité orientale :**

Cette unité est représentée par une bande tout à fait au Nord, cette bande rejoint l'unité centrale tout en s'estompant progressivement.

A l'Est, elle intruse la série inférieure à quartzite et cipolin au Sud, et est limitée directement par la faille centrale 4°50' au Nord. En son flanc occidental, elle recoupe la série moyenne volcanodétritique. Les formations de cette unité forment un domaine monotone avec un relief très peu accidenté, avec néanmoins des affleurements plus compacts constitués principalement de roches plus basiques mais de taille réduite relativement.

Les roches qui constituent cette unité sont représentées par des granites, granitoïdes, monzonite, syénite, diorite, gabbro et amphibolite. Les granites et granodiorites, se débitant en boules, prédominent largement en superficie, représentant environ 70-75 % de l'espace de l'unité. Les termes plus basiques, en l'occurrence des diorites et localement des gabbros, sont plus ou moins imposants.

Un second massif de roches neutre-basiques, limitant à l'Est la série volcanodétritique, se présente sous forme de bande linéaire de direction subméridienne, et qui prend de l'ampleur au Nord du massif TIHALIOUINE.

#### **b.2. L'unité centrale :**

## CHAPITRE 2 : GEOLOGIE DE LA REGION DE TIN FELKI

Cette unité représente la plus imposante superficie dans manifestation de ce complexe. Elle s'étend sur toute la feuille du Sud au Nord pour une largeur moyenne de 30-35 km environ. Dans sa partie orientale, le massif recoupe nettement la série volcanodétritique. A l'Ouest il est limité par la faille 4°13', Le mettant en contact avec le complexe granitoïde ADERNIBA.

Les deux unités, orientale et centrale, sont intimement liées spatialement, puisqu'elles ne font qu'un au Nord du périmètre.

Toutefois, la limite effective entre les deux unités, qui ont chacune ses propres caractéristiques pétrographiques, est matérialisée par la faille intrapharusienne 4°38'.

De part, sa grande représentation spatiale, cette unité renferme une grande variété de faciès de roche qui sont considérés comme étant le résultat d'une différenciation d'un même magma, de termes basiques aux termes acides en passant par les gabbros, diorites, granodiorites, ...

De même que pour toutes les unités la composition des roches façonne une topographie correspondante.

Les massifs basiques forment des affleurements compacts, alors que les granites granodiorites forment des regs plus ou moins clairsemés et un débit en boules caractéristique.

### **b.3. L'unité occidentale.**

Cette unité est séparée du reste, isolée par rapport aux deux unités précédentes. Cet isolement est matérialisé par un autre complexe granitoïde

### **C). Complexe granitoïde ADERNIBA**

Dans les limites de la feuille TIN FELKI, ce complexe est représenté par deux massifs granitiques distincts, repartis de part et d'autre de la faille 4°06' matérialisée par la chaîne de lentilles de roches ultrabasiques de l'oued ADERNIBA. Le premier massif, le plus imposant, est exprimé par une bande de direction subméridienne 0-5 NNE qui s'étend sur toute la longueur de la feuille du Sud au Nord. Les formations de ce complexe, les granites et deux cortèges aplo-pegmatitiques, recoupent sans équivoque les formations de la série volcanodétritique.

En surface, la topographie de ce complexe est l'un de ses traits particuliers. C'est un plateau ou reg, monotone et plat, pratiquement nu, avec de rares affleurements sous forme de carapaces ou en boules isolées dans ce plateau désolé. Ce complexe n'est représenté que par les granites granodiorites à grains variables souvent porphyroïde.

## **CHAPITRE 2 : GEOLOGIE DE LA REGION DE TIN FELKI**

### **D). Complexe post - tectonique de TAOURIRT.**

Les plutons dans ce complexe affleurent au sein de deux ensembles indifféremment à l'Est et à l'Ouest de la faille centrale 4°50'. Ce sont des massifs circonscrits, présentant des limites nettes avec l'encaissant, avec une configuration plus ou moins ovale, à l'exception du massif IMEHELLATENEISSEDENNE qui a eu deux présentent un corps imposant par la taille.

Il s'étend sur plus de 30 km de long pour une largeur de 7 à 10 km. La majorité des massifs présentent dans leurs parties, selon leur type, une orographie importante avec un dénivelé atteignant parfois 600 à 700 m.

Les premières données ont été fournies par M. LELUBRE, 1952, qui a distingué dans la composition des intrusions quelques variétés représentées par des granites à gros grains et parfois porphyroïdes ainsi que des leucogranites albitisés et muscovitisés à grains moyens et fins.

### **4. Tectonique.**

Toutes les formations affleurant dans les limites du périmètre d'étude (Feuille TIN FELKI) ont subi des déformations tectoniques faisant partie (où entrant dans le cadre) de celles qui ont affecté l'ensemble du bouclier Hoggar lors des multiples événements Tecton métamorphiques dont l'ultime est le PAN-AFRICAN entre 650 et 500 M.A. (ARMINES 1977).

Les déformations relevées dans le périmètre d'étude se résument notamment en une tectonique plicative souple et en tectonique cassante.

La tectonique souple est représentée par des plis à axes subméridiens relativement homogènes touchant la totalité des formations pharusiennes.

Les observations de terrain, l'établissement des coupes géologiques locales et l'étude des lames minces ont permis de définir une seule phase de plissement engendrant des plis droits, parfois légèrement coches vers l'Est avec une direction axiale N.S., ce qui en résulte qu'on observe sur terrain des facies de roches linéaires dans la direction méridionale avec un pendage moyen de 60° à 70° vers l'Ouest. Ces plis sont déterminés dans les séries ou assises purement détritiques par les séquences ou facies observés. La tectonique cassante est matérialisée par deux principaux systèmes de failles.

## CHAPITRE 2 : GEOLOGIE DE LA REGION DE TIN FELKI

Un système subméridien précoce, matérialisé par de grandes ruptures engendrant une compartimentation de même direction.

Cette compartimentation est, d'après le rejet de ces failles, d'ordre variable.

La faille centrale 4°50' met en contact des niveaux structuraux différents et d'âge différent. La chaîne Pharusienne à l'Est et les formations du Hoggar Central Polycyclique à l'Est, le long de laquelle se développe une intense zone de mylonites. R. CABY (1982), soutient que ce type de fractures sont des décrochements dont les déplacements latéraux atteignent ou dépassent la centaine de kilomètres.

### 5. Minéralisation

Le Septum Central est constitué par la série volcano-détritique, recoupée par les granitoïdes du complexe AFEDAFEDA et les formations ultrabasiques du complexe SEKSENE-AHANI. Cette zone présente la plus forte densité de points de minéralisation, particulièrement pour le nickel (Ni). Par ailleurs, la concentration des indices de minéralisation et des anomalies géochimiques concernant des éléments tels que Ni, As, Cu, Pb, Ag, est principalement localisée à proximité des accidents tectoniques de direction méridienne à subméridienne, ainsi qu'au niveau des structures orientées nord-est (N.E.), et aux intersections de ces deux systèmes.

Sur les 63 points de minéralisation recensés, environ 70 % sont attribués à des indices de Ni, Cu, Pb et Ag.

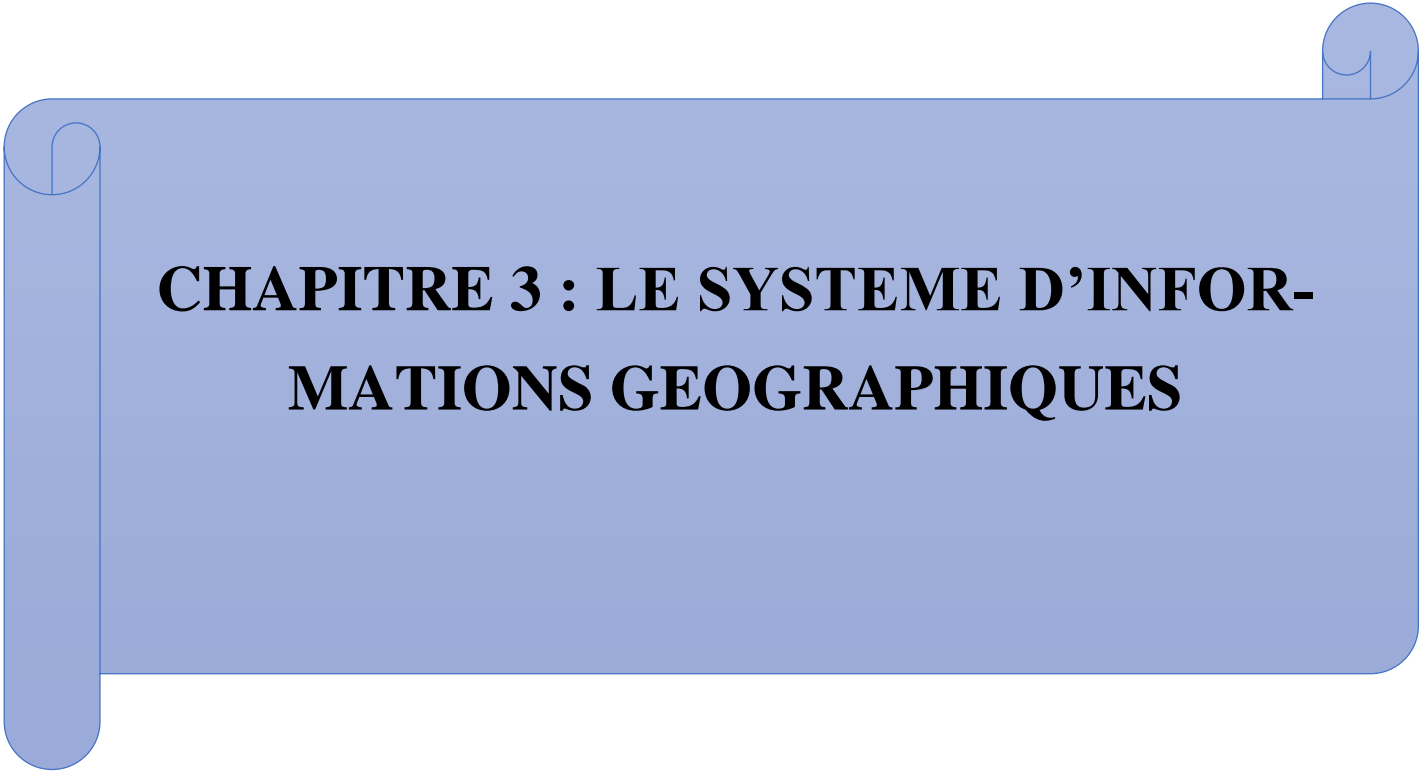
Contrairement à ces éléments, la répartition de l'or se concentre dans un bloc de direction N.E.-S.W., délimité par deux grands accidents majeurs de même orientation. Dans ce bloc se trouvent notamment l'indice d'Isselfane, le gisement de Tekouyat et le gisement polymétallique de Tan Chaffao. Il est à noter que l'indice d'Isselfane pourrait s'étendre vers le sud, en direction du nord de la feuille de Tin Felki, où plusieurs échantillons de sédiments de ruisseau (stream sediment) ont donné des résultats encourageants, atteignant jusqu'à 4 g/t en aval de cet indice.

Les points de minéralisation en étain (Sn) sont généralement associés aux plutons récents et à leur cortège de filons. Pour le tungstène (W), deux indices minéralisés ont été identifiés dans le nord-est de la feuille, au sein du domaine gneissique.

L'or se trouve lié à des filons quartzeux, souvent accompagnés de galène, pyrite et chalcopryrite. Ces filons sont fortement redressés, simples ou ramifiés, isolés ou regroupés en véritables champs filoniens, comme le champ de Tekouyat. Une proportion importante des filons

## **CHAPITRE 2 : GEOLOGIE DE LA REGION DE TIN FELKI**

aurifères semble associée au développement de roches basiques cataclasées et se localise préférentiellement à proximité des grandes failles méridiennes et des fractures orientées N.E.-S.W. (M. Bellal, 1991).



## **CHAPITRE 3 : LE SYSTEME D'INFORMATIONS GEOGRAPHIQUES**

# CHAPITRE 3 : LE SYSTEME D'INFORMATIONS GEOGRAPHIQUES

## 1. Introduction

Définition d'un SIG (Système d'Information Géographique)

Un Système d'Information Géographique (SIG), anciennement appelé Système d'Information à Référence Spatiale (SIRS), est une organisation structurée de ressources destinée à acquérir, conserver, traiter et diffuser des données associées à une référence spatiale. En d'autres termes, il s'agit d'un outil informatique qui permet d'effectuer différentes opérations sur des données géographiques.

Un SIG regroupe ainsi plusieurs composantes essentielles :

- **Une problématique** : qui peut consister à décrire, stocker, comparer, comprendre, communiquer ou encore simuler des phénomènes.
- **Du matériel** : ordinateurs, périphériques, réseaux et équipements techniques.
- **Des logiciels** : solutions SIG disponibles sur le marché ou développements spécifiques adaptés aux besoins.
- **Des données** : à la fois génériques et spécifiques en fonction des thématiques étudiées.
- **Du savoir-faire humain** : compétences et expertise des utilisateurs dans l'exploitation des données et des outils.

### Nature de l'information géographique

Une information est dite géographique lorsqu'elle est associée à une localisation dans un système de référence spatiale sur la Terre.

Elle possède deux composantes:

- **Une composante graphique** : qui représente la forme, la position et la localisation de l'objet dans un référentiel cartographique.
- **Une composante attributaire** : qui regroupe les caractéristiques qualitatives et/ou quantitatives décrivant l'objet (descriptions géométriques et thématiques).

### Structure d'un SIG

Un SIG est constitué de deux types de données :

- **Des données spatiales** : qui définissent la forme, la position et la localisation des objets observés dans l'espace.

# CHAPITRE 3 : LE SYSTEME D'INFORMATIONS GEOGRAPHIQUES

• **Des données alphanumériques** : qui décrivent les caractéristiques associées aux objets géographiques sous forme de textes ou de valeurs numériques.

## Les 5 grandes fonctionnalités d'un SIG

Un SIG repose sur cinq fonctions essentielles :

1. **Abstraction** : modélisation et représentation de l'information géographique.
2. **Acquisition** : collecte et intégration des données existantes ou nouvelles dans le système.
3. **Archivage** : stockage structuré et organisé des données pour une consultation et une exploitation aisée.
4. **Analyse** : interrogation, traitement et analyse des données spatiales et attributaires — c'est le cœur opérationnel du SIG.
5. **Affichage**: restitution graphique.

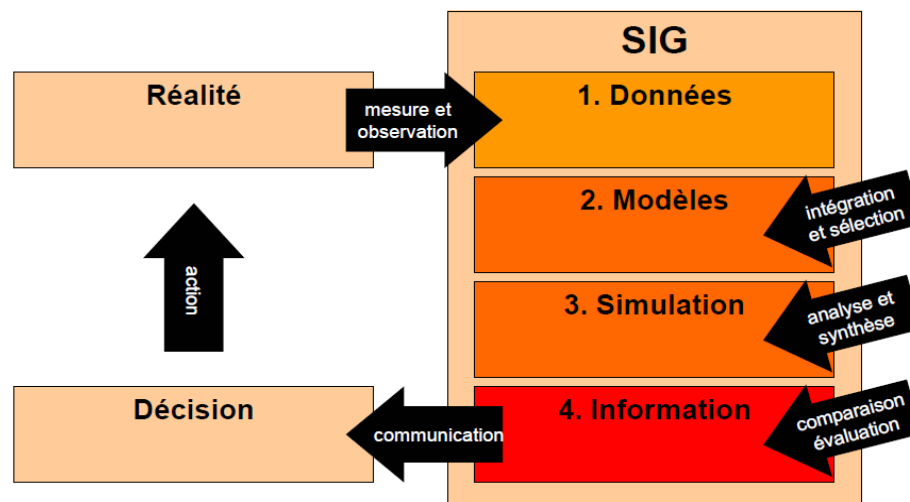


Figure. 04 : Le cycle des SIG

## 2. Mode de représentation des données dans un SIG

### 2.1 données raster

Dans ce mode de représentation, la réalité (voir Fig. 6) est modélisée sous forme d'une grille régulière et rectangulaire, composée de lignes et de colonnes. Chaque cellule de cette grille, appelée maille ou pixel, possède une valeur qui correspond à une intensité de gris, une couleur ou une valeur numérique (Fig. 5).

## CHAPITRE 3 : LE SYSTEME D'INFORMATIONS GEOGRAPHIQUES

La juxtaposition de l'ensemble de ces cellules permet de reconstituer visuellement l'aspect de l'espace représenté et d'associer une information à chaque emplacement. Par exemple, une zone forestière sera matérialisée par un ensemble de pixels ayant la même intensité ou la même couleur, traduisant ainsi son étendue et sa position dans l'espace.

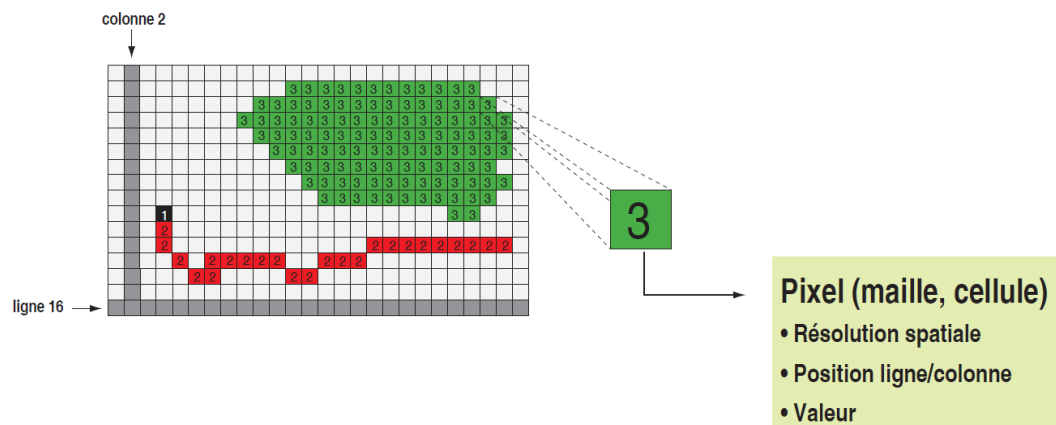


Figure 05 : Représentation des Pixels dans une image raster.

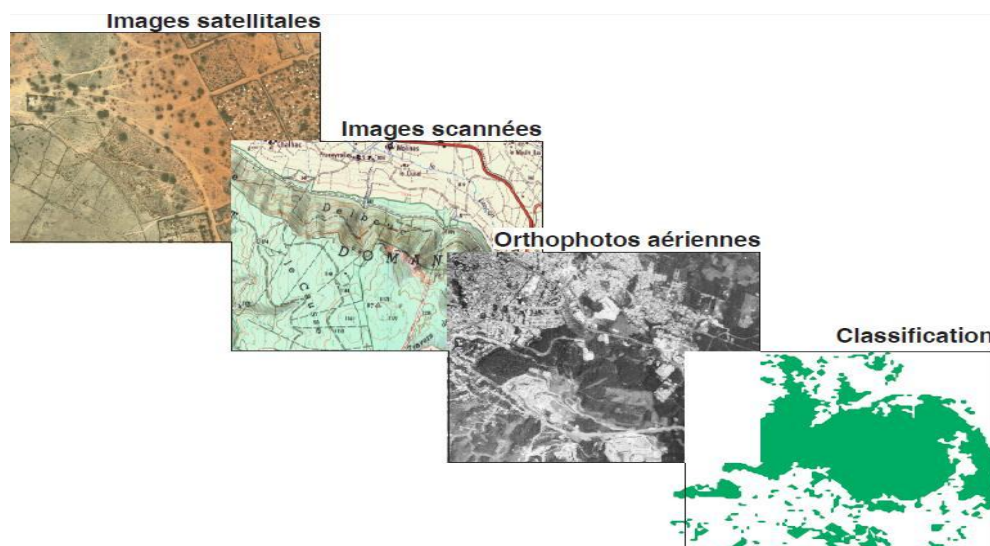


Figure. 06 : Exemples Des Données Raster.

### 2.2. Les Données vectorielles

Elles contiennent 3 grands types d'objets (Fig :07), avec lesquels on peut représenter tout objet géographique :

i. Le point : la localisation des points de prélèvements de la minéralisation.

ii. La ligne : les failles continues et discontinues.

iii. Le polygone : les contours des formations lithostratigraphiques, extrait des cartes géologique.

# CHAPITRE 3 : LE SYSTEME D'INFORMATIONS GEOGRAPHIQUES

➤ Les couches vectorielles, à l'inverse, permettent d'individualiser chaque objet (Point, ligne, polygone) et de lui associer des données exemples Des Données Raster.

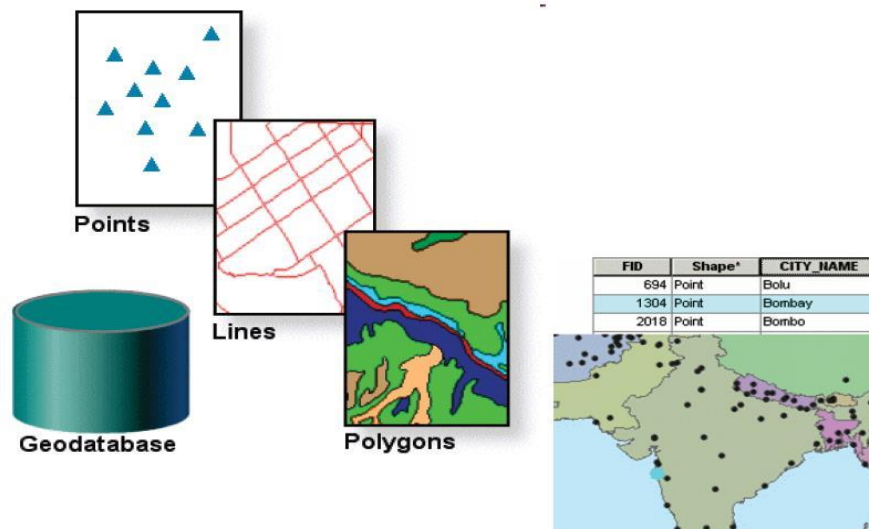


Figure 7 : Exemples des données vecteurs.

Une couche regroupe généralement des éléments géographiques de même nature ou de même type (par exemple, une couche pour les routes, une autre pour les rivières, etc.).

## 3. Domaines d'application des SIG

Les domaines d'application des SIG sont multiples et couvrent des secteurs très divers. Parmi les plus importants, on peut citer:

- **Géologie** : pour la prospection minière et l'analyse des structures géologiques.
- **Hydrologie** : gestion des ressources en eau et des bassins versants.
- **Tourisme** : gestion des infrastructures, des sites et des itinéraires touristiques.
- **Marketing** : localisation des clients et analyse de l'implantation des points de vente.
- **Planification urbaine** : gestion de la voirie, des réseaux d'assainissement et de la croissance urbaine.
- **Protection civile** : gestion des risques et prévention des catastrophes naturelles ou industrielles.
- **Transports** : planification des réseaux de transports urbains et optimisation des itinéraires.
- **Forêt** : cartographie pour l'aménagement forestier, la gestion des coupes et la sylviculture.
- **Biologie** : études sur les déplacements et habitats des populations animales.

## CHAPITRE 3 : LE SYSTEME D'INFORMATIONS GEOGRAPHIQUES

- **Télécommunications** : implantation optimale d'antennes relais pour les réseaux mobiles.

### 4. Avantages des SIG et logiciels SIG pour l'analyse spatiale

- Localisation spatio-temporelle des événements.
- Réactivité après incidents ou événements territoriaux.
- Calcul des coûts, bénéfices ou impacts.
- Association de plusieurs partenaires à des projets d'aménagement.
- Production d'itinéraires ou de plans thématiques adaptés.
- Accès simple aux données attributaires.
  
- Croisement rapide de couches géographiques et attributaires.
- Stockage clair et structuré.
- Gestion simultanée de multiples informations attributaires.
- Analyse des phénomènes et prévision des risques.
- Réalisation de cartographies instantanées.

### 5. Exemples des logiciels SIG.

- ArcView, ArcGis et ArcInfo
- MapInfo
- GéoConcept
- Géomédia
- APIC
- Arc Reader et Arc Explorer
- GRASS GIS
- GMT
- Quantum GIS
- GvSI

### 6. Les étapes de réalisation d'un SIG

#### 6.1. Acquisition des données

L'une des premières étapes dans un SIG consiste à acquérir des données spatiales et attributaires. Cette acquisition peut se faire par différents moyens :

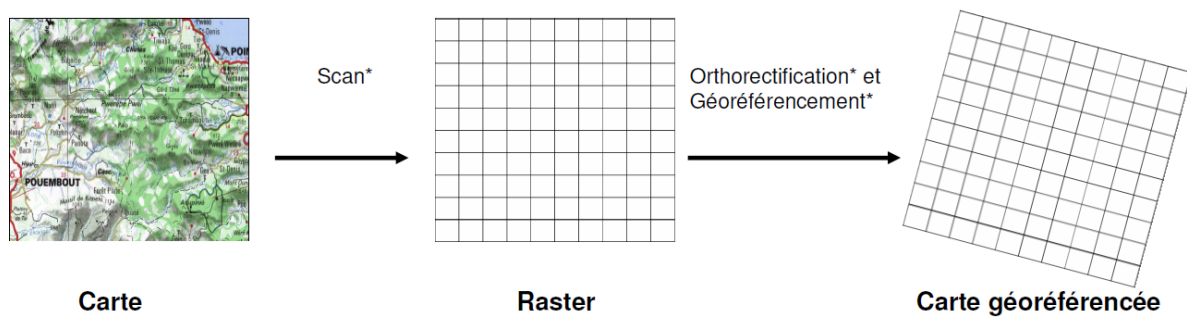
- **Levers de terrain** : collecte directe sur le terrain par des équipes d'opérateurs.

## CHAPITRE 3 : LE SYSTEME D'INFORMATIONS GEOGRAPHIQUES

- **Levers topographiques** : relevés précis des formes du terrain à l'aide d'instruments topographiques.

- **Relevés GPS** : acquisition de coordonnées géographiques par satellites pour positionner des éléments avec précision.

- **Scannérisation** : de plans, de cartes, de photos aériennes etc., (Fig : 08)



*Figure 8 : Scannérisation*

### 6.2. Géoréférencement

- **Définition**

C'est le rattachement de données à des coordonnées géographiques. Cela permet de positionner des objets ou des informations sur la surface terrestre, base indispensable en géomatique (Alexandre. H, 2014).

- **Définition de l'espace de travail**

Avant de travailler dans un SIG :

- Délimiter la zone d'étude via des coordonnées cartographiques.
- S'assurer que toutes les couches à superposer utilisent le même système de projection pour garantir leur conformité et leur cohérence.

- **Choix du système de projection**

La Terre étant un géoïde (forme irrégulière), on la représente par un ellipsoïde de révolution.

Pour projeter cet ellipsoïde sur un plan, plusieurs systèmes de projection sont utilisés :

- Conforme de Mercator

## CHAPITRE 3 : LE SYSTEME D'INFORMATIONS GEOGRAPHIQUES

- Équivalente de Lambert
- Aphylactique (compromis)
  - **La projection des données**

• **Images raster** : Correction géométrique via des points d'appui (points de contrôle) pour redresser l'image.

• **Images Vecteur** : Application des mêmes règles (nombre et répartition homogène des points d'appui).

### 6.3. Digitalisation (ou vectorisation)

Cette étape consiste à convertir des données analogiques ou raster en données vectorielles exploitables dans le SIG. Elle inclut:

#### ➤ **Import de données:**

- Données graphiques raster ou vecteur et fichiers attributaires associés.
- Données endogènes (produites en interne) ou exogènes (issues d'autres services, institutions ou partenaires).

#### ➤ **Vérification et validation des données avant intégration :**

##### • **Composante attributaire:**

- Vérification de la structure et de la cohérence des tables.
- Suppression des doublons.
- Contrôle de la présence de tous les attributs nécessaires.
- Vérification de l'orthographe et des formats des données.

##### • **Composante spatiale:**

- Compatibilité du système de coordonnées avec les données sources.
- Contrôle de la géométrie des objets (points, lignes, polygones).
- Vérification de la topologie (relations entre objets : intersections, recouvrements, voisinages...).

## CHAPITRE 3 : LE SYSTEME D'INFORMATIONS GEOGRAPHIQUES

- Comparaison avec des données de référence pour s'assurer de la précision.

### 6.4. Traitement et analyse des données

- **Visualisation :**

- Affichage graphique des données selon leurs attributs.
- Visualisation localisée (zoom) et à différentes échelles (par exemple : pour une carte au 1/25 000, 1 cm sur la carte équivaut à 250 m sur le terrain, selon Antoine D., 2012).

- **Organisation et interrogation des données :**

Utilisation de logiciels permettant d'organiser, trier et interroger les données thématiques (par ex. : Excel, Access, Oracle...).

- **Utilisation d'outils d'analyse spatiale :** Quelques exemples :
- **Croisement de couches :** découpage, union, intersection...
- **Opérations sur une seule couche :** fusion, agrégation de polygones ou de données similaires.

## 7. Gestion des données dans un SIG

Les données sont le capital essentiel d'un SIG. Leur gestion rigoureuse est indispensable.

- **Bien les ranger :** Organiser les données par projet, par type (raster, vecteur, table attributive...), et par version (données brutes, après traitements...).
- **Les protéger :** Stockage sécurisé (sur ordinateur, serveur...), gestion des droits d'accès, sauvegardes régulières, gestion de l'historique.
- **Mettre à jour :** Définir les responsables, la fréquence, les informations à intégrer et en contrôler l'intégrité.
- **Archiver :** Décider ce qu'il faut conserver en fin de projet et choisir les supports d'archivage adaptés

## 8. Présentation du logiciel ArcGIS

### 8.1. Introduction

Le logiciel **ArcGIS** est un système d'information géographique (SIG) qui permet l'acquisition, le stockage, la mise à jour, la manipulation et le traitement de données géographiques. Il offre également des fonctionnalités avancées pour la cartographie et l'analyse spatiale, avec une précision adaptée à l'échelle souhaitée (Guerreiro, 2012).

ArcGIS se présente sous la forme d'une suite logicielle composée de trois versions principales : **ArcView**, **ArcEditor** et **ArcInfo**. Ces versions se distinguent par le nombre de fonctionnalités disponibles, **ArcView** étant la version de base avec le moins d'options et **ArcInfo** la plus complète.

➤ Chaque version de la suite ArcGIS comprend :

- ❖ **Une interface ArcMap** : pour la visualisation et la manipulation des données.
- ❖ **Une interface ArcCatalog** : pour la gestion et l'organisation des fichiers et bases de données géographiques.

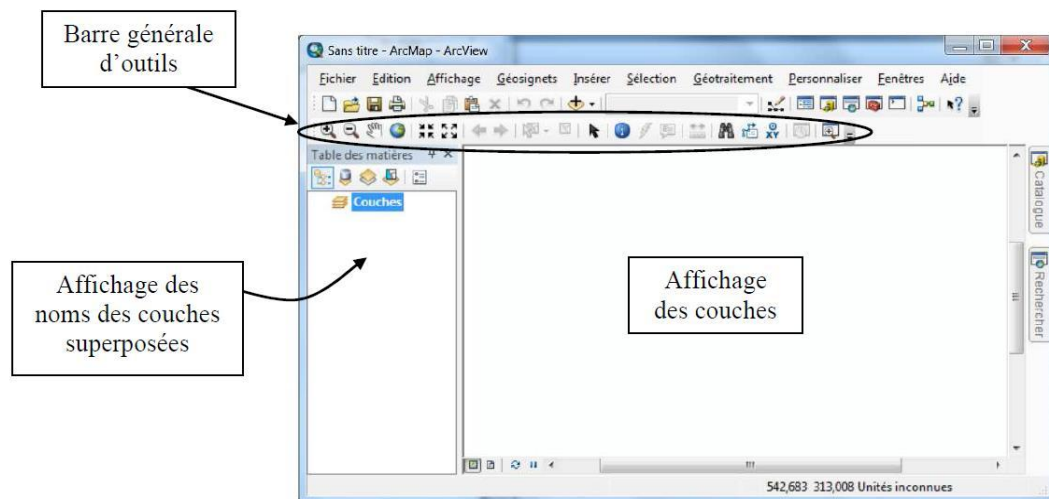
- Dans les versions antérieures à **ArcGIS 9.0**, une interface **ArcToolBox** séparée permettait d'accéder aux outils d'analyse et de traitement.
- À partir de la version **10.0**, les interfaces **ArcCatalog** et **ArcToolBox** sont intégrées directement dans l'environnement de travail d'**ArcMap**, facilitant ainsi leur utilisation.

### 8.2. Présentation de l'interface ArcMap

L'interface ArcMap permet d'afficher, d'interroger, de modifier, de créer et d'analyser des données sous forme de tables attributaires ou de cartes (Fig. 9). Elle facilite également la mise en page des cartes pour leur impression, leur insertion dans d'autres documents ou leur diffusion sous forme électronique.

Grâce à ses fonctionnalités variées, ArcMap constitue l'élément central d'ArcGIS pour la gestion et la représentation cartographique des données spatiales.

# CHAPITRE 3 : LE SYSTEME D'INFORMATIONS GEOGRAPHIQUES



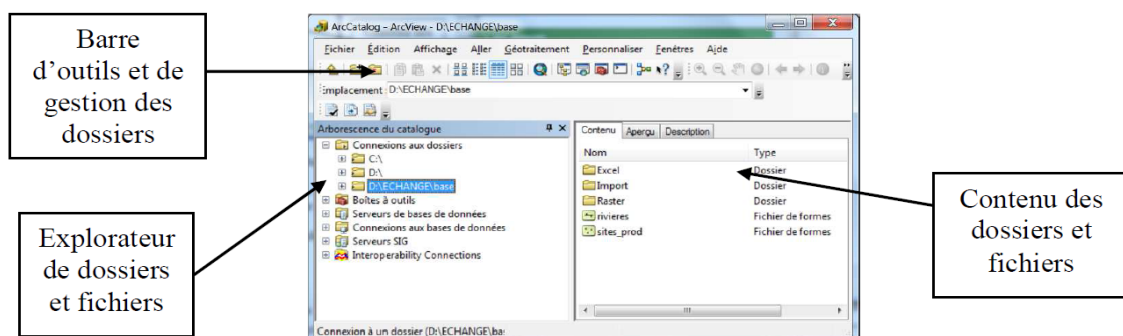
**Figure 9 : L'interface d'ArcMap**

(La barre d'outils renferme les outils de navigation sur les données graphiques des couches, ainsi que les outils d'affichage rapide de données sémantiques (attributaires) liées aux entités graphiques.)

## 8.3. Présentation de l'interface ArcCatalog

ArcCatalog permet de passer en revue, organiser, distribuer et modifier les éléments de propriétés de données géographiques (Fig 10).

L'interface permet d'employer des méthodes graphiques ou textuelles pour passer en revue, contrôler ou modifier l'ensemble des données.



**Figure 10 : L'interface d'ArcCatalog.**

C'est dans cette interface que l'on exécutera les actions les plus courantes suivantes :

- Créer des nouvelles données (couches ou shape files, géodatabases...) ou supprimer une couche (soit l'ensemble des fichiers correspondants au shape file).

## CHAPITRE 3 : LE SYSTEME D'INFORMATIONS GEOGRAPHIQUES

➤ Attribuer un system de coordonnées lorsqu'il n'est pas reconnu par le logiciel, ou non renseigné.

➤ Avoir un aperçu géographique ou attributaire d'une couche donnée.

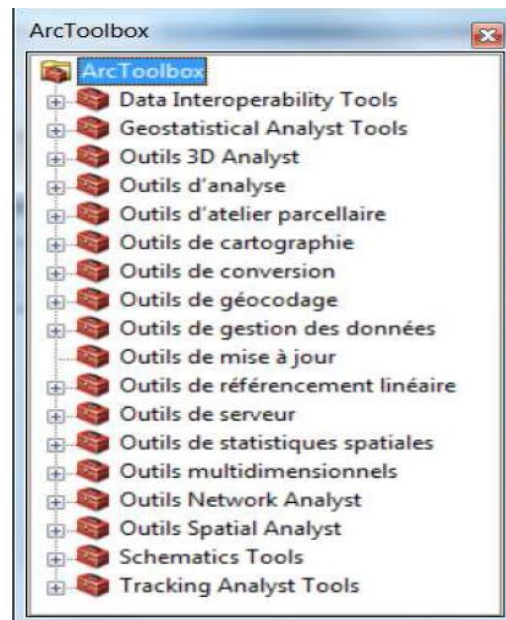
L'interface ArcCatalog est disponible au travers d'ArcMap, ce qui facilite grandement la gestion des fichiers. Cet onglet se charge soit à partir de l'icône dans la barre de standard d'ArcMap, soit à l'aide de l'onglet de la fenêtre.

### 8.4. ArcToolbox

ArcToolbox est un module intégré dans ArcGIS 10 qui donne accès à l'ensemble des fonctionnalités avancées de traitement et d'analyse spatiale (Fig. 11).

Cette boîte à outils propose un large éventail de fonctions de géotraitement, permettant de réaliser des analyses spatiales, des opérations sur les données géographiques et des traitements complexes. Elle offre également la possibilité de convertir des formats de données pour faciliter l'importation et l'exportation de fichiers, ainsi que d'effectuer des changements de projection et des transformations de systèmes de coordonnées.

Grâce à ses nombreuses options, ArcToolbox constitue un outil essentiel pour le traitement et la gestion efficace des données géographiques dans ArcGIS.



*Figure 11 : L'interface de l'ArcToolBox*



**CHAPITRE 04 : LE SIG APPLIQUE A  
LA REGION D'ETUDE**

# CHAPITRE 04 : LE SIG APPLIQUE A LA REGION D'ETUDE

## 1. Introduction.

ArcGIS est un logiciel que nous avons utilisé dans ce travail à fin d'atteindre l'objet principal, qui est la cartographie SIG d'une carte géologique de la région de tin felki.

- Ce travail a été fait à partir des images des cartes géologiques de l'ORGM numérisées.
- La région d'étude (tin felki) est à 1/200 000.

En résumé, La méthode consiste à numériser la carte, puis vectorisation de la carte, préparation d'un fichier Excel pour les minéralisations, intégration du fichier Excel dans le logiciel ArcGIS, sa transformation en une couche d'information vectorielle, et finalement impression de carte géologique.

## 2. Les étapes suivies, au début jusqu'au géoréférencement de la carte.

### 2.1. Insertion de la carte (image raster) vers ArcMap.

Insertion de la carte vers ArcMap, où on effectue le travail principal, se fait d'abord par un passage d'ArcCatalog.

Démarrer ArcCatalog par cliquant son icône, puis à la barre d'outils, cliquer connexion à un dossier (Fig 12), C'est pour se connecter avec le dossier où la carte géologique en format raster est stocké dans l'ordinateur, il s'ouvre une interface qui montre tous les disques dans un ordinateur donc c'est à l'utilisateur de chercher le dossier où il a stocké ses cartes scannées dans son ordinateur (Fig 13)

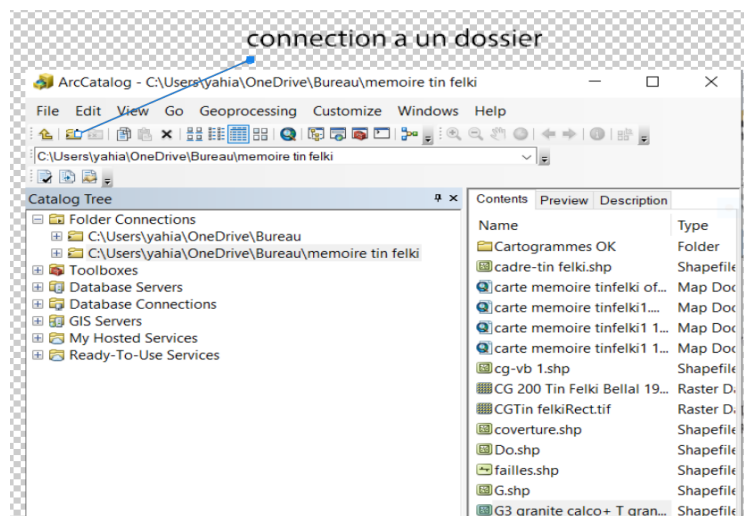
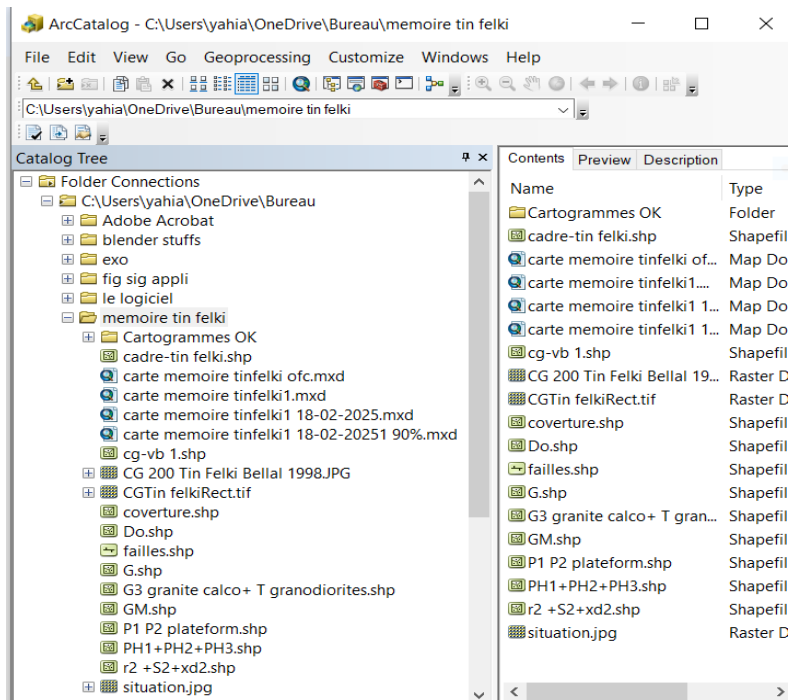


Figure 12 : Une présentation d'interface d'ArcCatalog montrant icône connexion à un dossier.

## CHAPITRE 04 : LE SIG APPLIQUE A LA REGION D'ETUDE



*Figure 13 : Interface montrant les disques et les dossiers où l'utilisateur cherche l'emplacement de carte scannée.*

Après d'avoir connecté au dossier où est stockée la carte en format image, on procède à l'attribution de la référence spatiale par clique droite de l'image de carte pour obtenir les options puis cliquer Propriétés pour obtenir une interface Propriétés du jeu de données raster pour mettre la référence spatiale.

### **2.2. Attribution de La référence spatiale.**

Dans l'interface propriétés du jeu de données raster (Fig 14), on modifier le cadre de la référence spatiale et mettre la référence spatiale qui coïncide avec celle de la région étudiée, et aussi construire des Pyramides (Fig 15), malgré que les Pyramide peuvent être construire même après cette étape, au moment de transfert la carte vers ArcMap soit par la méthode de glisser la carte de ArcCatalog vers ArcMap ou bien par un accès direct avec ArcMap.

# CHAPITRE 04 : LE SIG APPLIQUE A LA REGION D'ETUDE

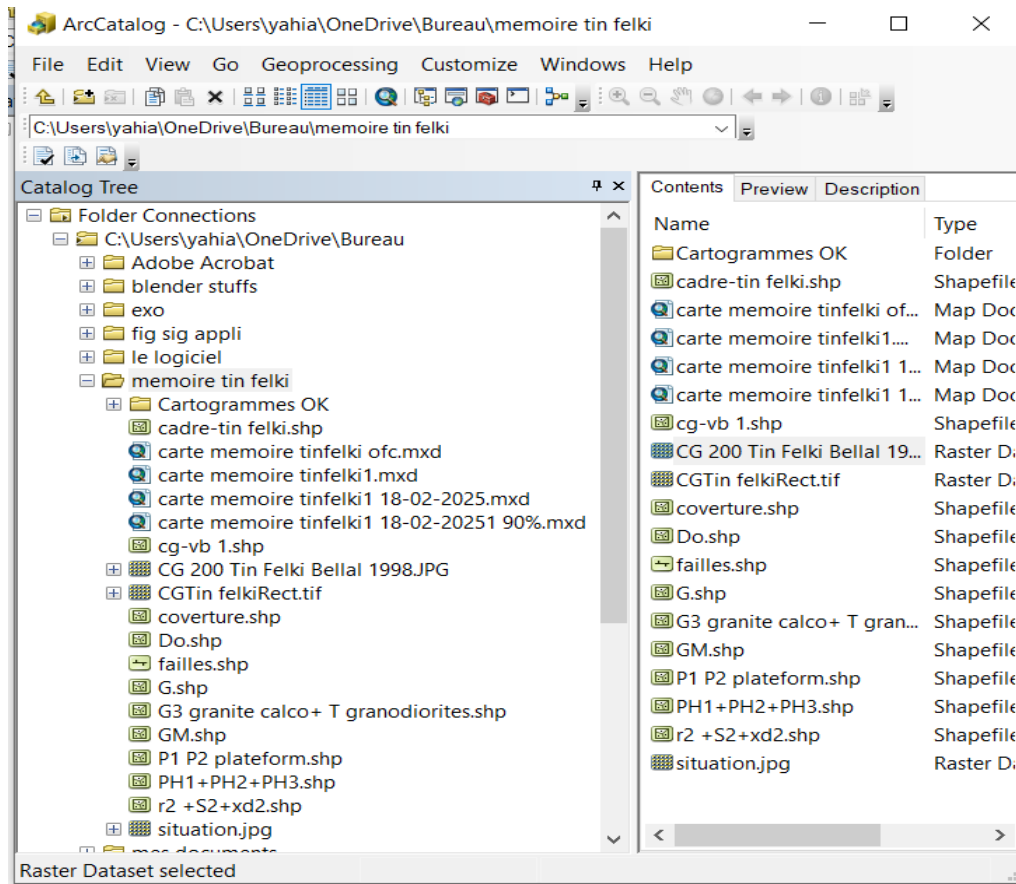


Figure 14 : Montrant le chemin de la carte de tin felki vers l'interface propriétés

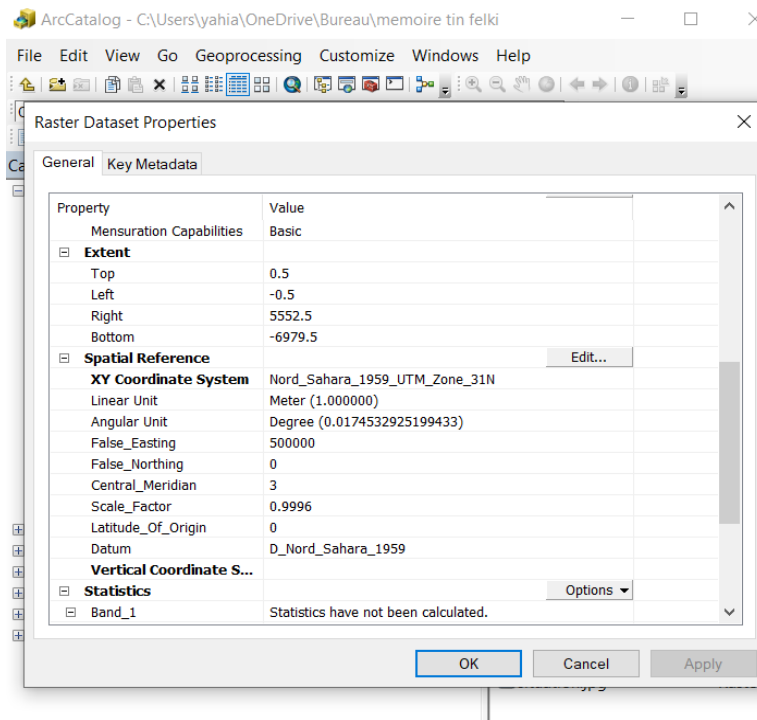


Figure 15 : Modification de la référence spatiale dans un « Propriétés du jeu de données raster ».

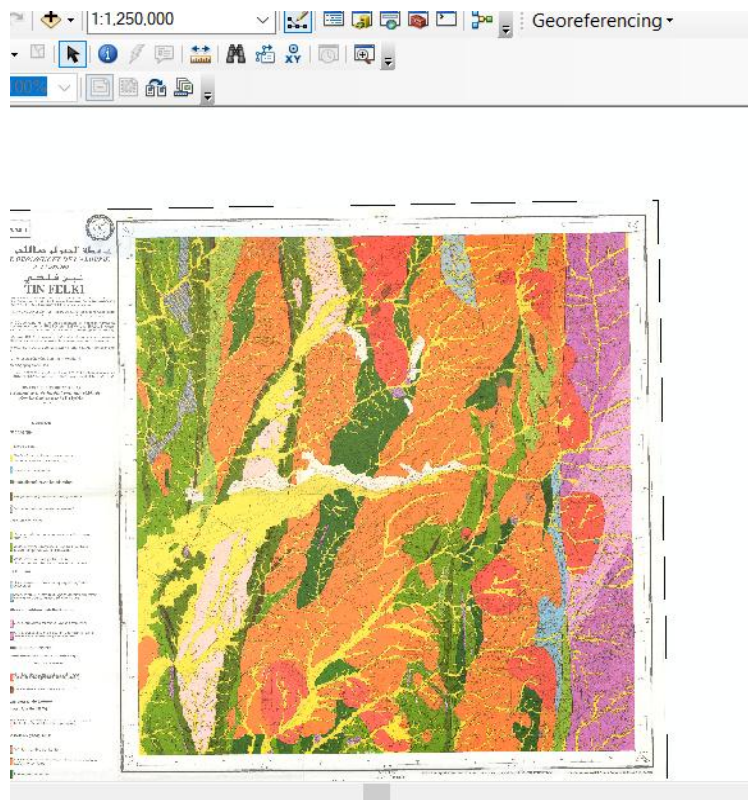
## CHAPITRE 04 : LE SIG APPLIQUE A LA REGION D'ETUDE

➤ La carte géologique tin felki, à la zone 31, donc pour la modification de sa référence spatiale, Après cliquer **Modifier** au Propriétés du jeu de données raster, le chemin suivi est celui : Modifier → Sélection → Référence spatiale → Projected Coordinate system → UTM → Africa → Nord Sahara 1959 UTM Zone 31N → Appliquer → OK.

➤ Quand on arrive à effectuer cette étape de mettre la référence spatiale, On démarre ArcMap puis glisser et déposer la carte référenciée d'ArcCatalog vers ArcMap puis on procède au déréférencement de la carte.

### 2.3. Géoréférencement de la carte.

C'est une manipulation qui consiste à caler la carte en ArcMap, en cliquant L'outil « Géoréférencement » localisé à la barre d'outils puis décocher "Ajustement automatique". On ajoute 4 (quatre) points de contrôle en utilisant l'outil « Ajouter des points de contrôle », ce sont des coordonnées géographiques en Degrée Minutes Secondes (DMS), Longitude et Latitudes à chaque point (Fig 16). Ces points sont ajoutés par l'ordre, dans le sens des aiguilles d'une montre.



*Figure 16 : Le schéma, en ArcMap, montrant une carte géoréférencée*

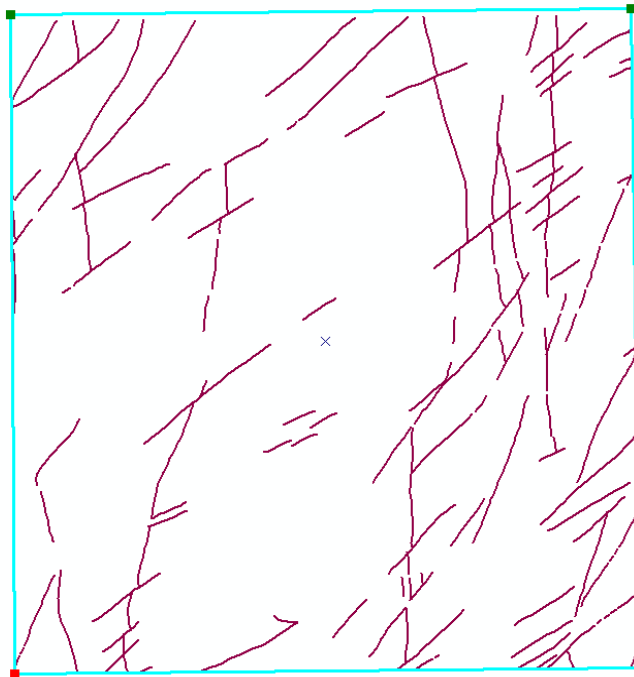
## CHAPITRE 04 : LE SIG APPLIQUE A LA REGION D'ETUDE

### 3. La vectorisation des différentes formations géologiques.

Après avoir ajouté la référence spatiale, rectifier la carte et effectuer le géoréférencement, On procède à la vectorisation de différentes formations. A la carte d'Ifetessene, les failles ont été vectorisées en poly lignes, Les formations géologiques en polygone et les minéralisations en points.

#### 3.1. Vectorisation de Failles (polyline)

En prenant la carte de tin felki, Les failles regroupées en 4 (quatre) catégories : les failles principales certaines qui sont remarquées par une continuité et une largeur importante, failles principales masquées par les dépôts meubles qui sont remarquées par une discontinuité mais avec aussi une largeur importante, failles secondaires certaines remarquées par une largeur mince et une continuité, et enfin les failles secondaires masquées par les dépôts meubles marquées par une discontinuité et aussi une largeur mince (Fig 17).



*Figure 17 : Montrant les différentes failles vectorisées de la feuille de tin felki.*

#### 3.2. Vectorisation des formations géologiques. (POLYGONE)

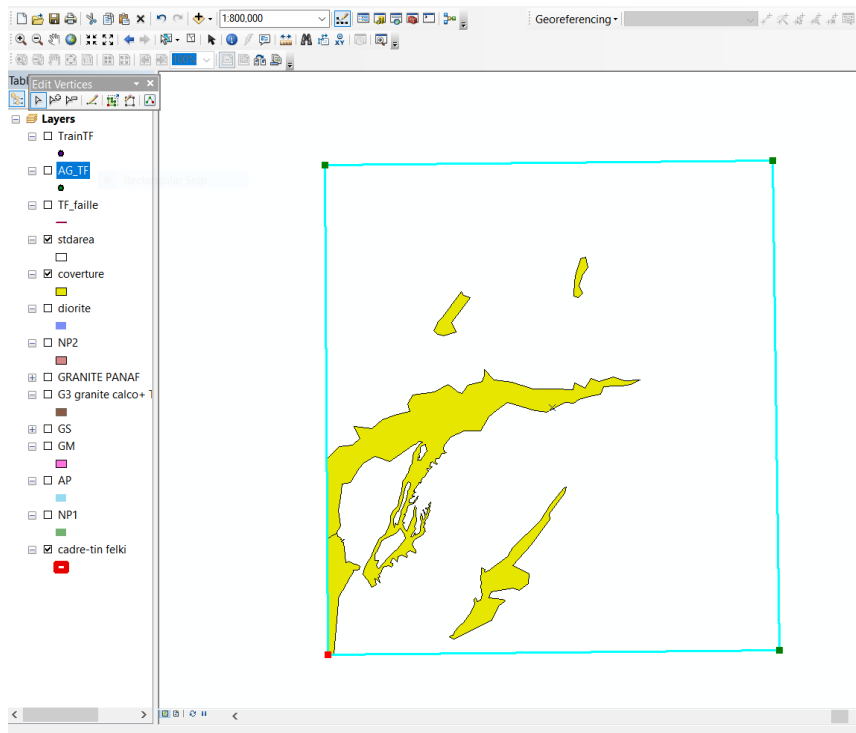
Après la vectorisation de toutes les failles, Toutes les couches sont vectorisées en faisant attention de ne pas oublier mettre la référence spatiale de chaque couche à vectoriser, correspondant à la référence spatiale de la région de la carte, a la même feuille de tin felki.

## CHAPITRE 04 : LE SIG APPLIQUE A LA REGION D'ETUDE

Les couches surfaciques sont des zones entièrement délimitées par des segments de ligne droite, des arcs (circulaires ou elliptiques) et des courbes de Bézier reliant différents sommets. Elles permettent de représenter des entités naturelles ou techniques caractérisées par des surfaces planes et fermées. La création d'une entité surfacique nécessite la génération d'un fichier de formes de type "Polygone".

### Lithostratigraphie

En appliquant cette méthode à l'ensemble des entités lithostratigraphiques de la carte de tin felki, nous avons procédé à la vectorisation de toutes les couches "Polygones" correspondant aux formations lithostratigraphiques. Le processus de vectorisation a débuté par la formation « couverture », servant de point de départ à l'intégration progressive des autres unités lithostratigraphiques.



*Figure 18 : Cas de vectorisation d'une couche géologique couverture dans la région de Tin felki sous ArcMap*

**Magmatisme :** Pour entamer la vectorisation des couches magmatiques, nous avons suivis le même processus pour celle de la formation magmatique.

# CHAPITRE 04 : LE SIG APPLIQUE A LA REGION D'ETUDE

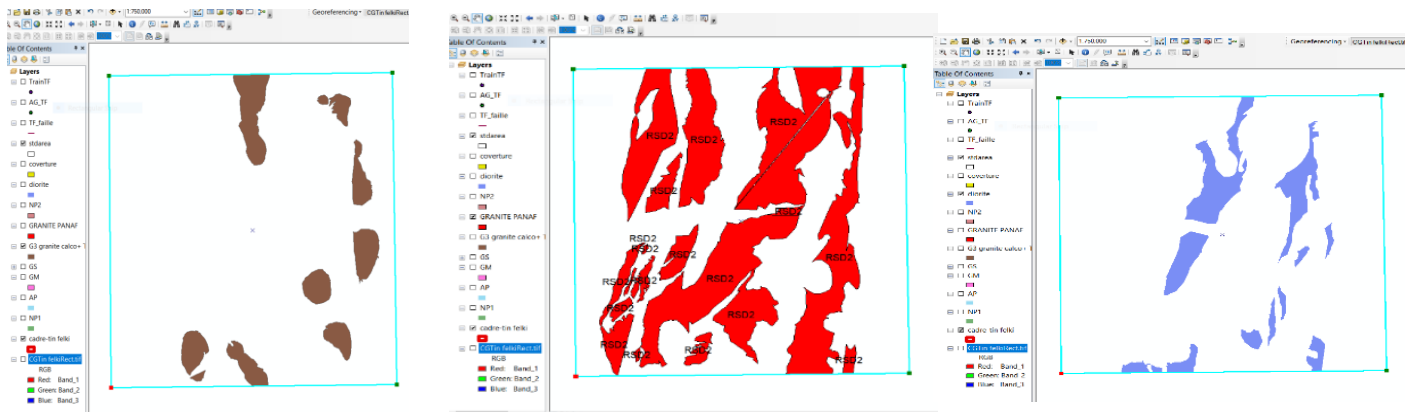


Figure 19 : Résultat de la vectorisation des couches magmatique dans la région de Tin Felki sous ArcMap

## Métamorphisme

La vectorisation des zones de métamorphisme de la carte de Tin Felki, représentées par les formations du Protérozoïque terminal, a été réalisée en suivant la même approche méthodologique que celle appliquée aux couches magmatiques et lithostratigraphiques.

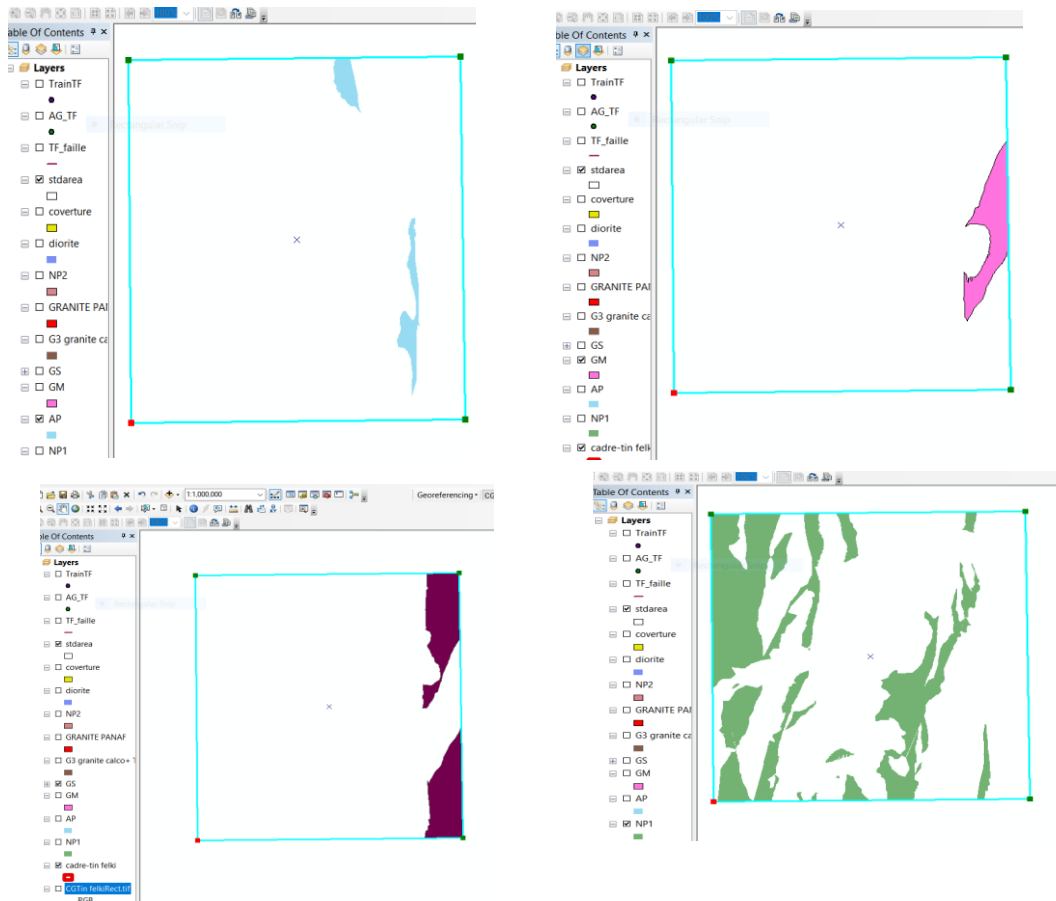
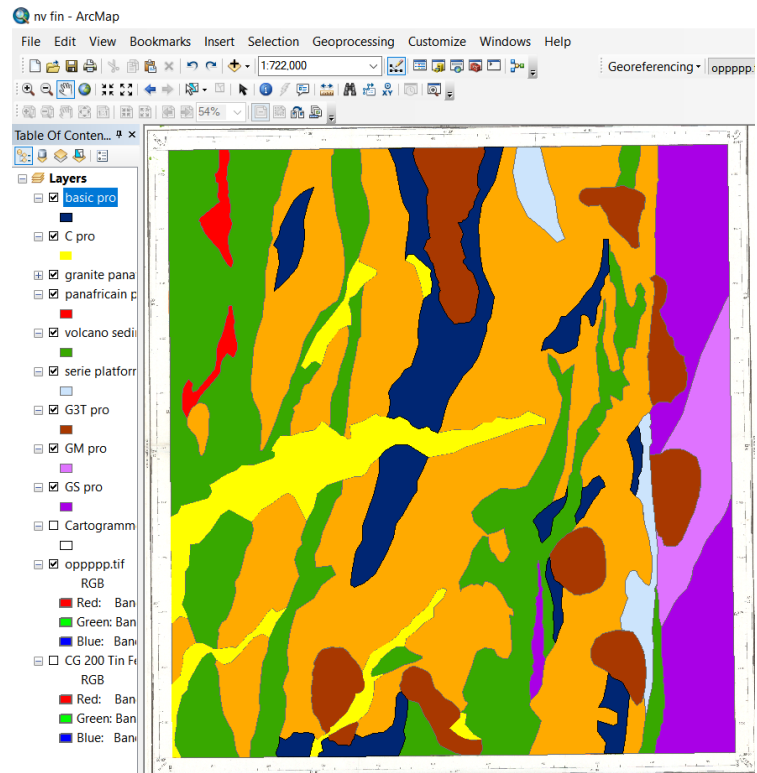


Figure 20 : Processus de vectorisation appliqué à une unité métamorphique dans la région de Tin felki sous ArcMap

# CHAPITRE 04 : LE SIG APPLIQUE A LA REGION D'ETUDE



*Figure 21 : carte géologique vecteur simplifier de TIN FELKI*



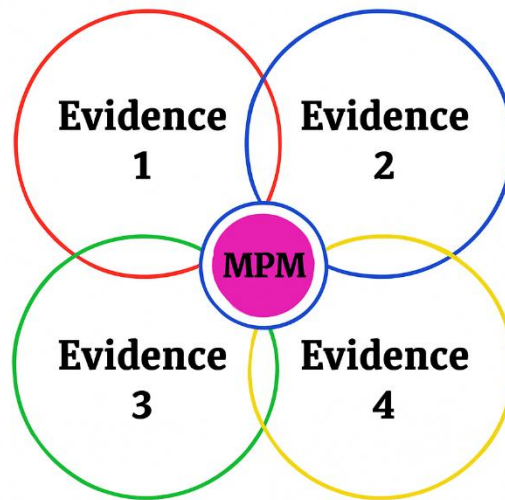
## **CHAPITRE 05 : MODELISATION GEOMATIQUE**

# CHAPITRE 5 : : MODELISATION GEOMATIQUE

## 1-Introduction :

L'exploitation des méthodes géomatiques dans le domaine de l'exploration minérale repose avant tout sur une collecte approfondie de données géoscientifiques variées. La méthode des poids de l'évidence, ancrée dans les principes des statistiques bayésiennes, permet d'évaluer la relation spatiale entre des points d'entraînement et des cartes prédictives binaires. En s'appuyant sur le théorème de Bayes, cette approche combine ces cartes par pondération, en intégrant les probabilités a priori, afin de générer une carte finale, connue sous le nom de "carte des probabilités postérieures". Cette méthodologie a été largement documentée dans les travaux de Bonham-Carter (1989, 1994), Wang et al. (2002) et Carranza (2009).

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 :



*Figure 22 : principe Bayésien de combinaisons prédictives*

## 2-La description de la méthode :

La méthode des poids de l'évidence (WofE) constitue aujourd'hui l'approche statistique la plus couramment employée dans l'exploration minérale en raison de son objectivité et de son accessibilité. Cette dernière est facilitée par la disponibilité de logiciels SIG modernes et adaptés, tels qu'ArcGIS et MapInfo, permettant une mise en œuvre efficace et simplifiée de cette modélisation.

## CHAPITRE 5 : : MODELISATION GEOMATIQUE

- La probabilité antérieure.
- La probabilité postérieure.

Afin de garantir la validité des calculs, il est impératif que :

- o La taille de chaque pixel soit suffisamment réduite pour contenir au plus un seul gisement.
- o Les cartes prédictives soient conditionnellement indépendantes.

La dimension du pixel influence directement la précision des résultats. À une échelle de 1/200 000, une taille de 1 km<sup>2</sup> par pixel est généralement préconisée. Un exemple concret est présenté dans le chapitre afin d'illustrer l'application de cette méthodologie.

### 2.1 La probabilité antérieure

Dans la méthode des poids de l'évidence (WofE), la probabilité antérieure correspond à la probabilité qu'un gisement minéral soit présent dans un pixel donné de la région d'étude, indépendamment des évidences prédictives telles que la géologie ou la tectonique. Elle reflète ainsi la densité apparente de la minéralisation dans la zone analysée.

Dans l'exemple illustratif:

- La région d'étude s'étend sur une superficie de 10 000 km<sup>2</sup>, soit un total de 10 000 pixels (chaque pixel représentant 1 km<sup>2</sup>).
- On y recense 25 gisements connus ( $N(D) = 25$ ).

La probabilité antérieure se calcule selon la formule suivante :

$$P(D) = \frac{N(D)}{N(T)} = \frac{25}{10\,000} = 0,0025, \text{ soit } 0,25\% \quad P(D) = \frac{N(D)}{N(T)} = \frac{25}{10\,000} = 0,0025, \text{ soit } 0,25 \%$$

Ce résultat indique qu'en moyenne, un pixel sur 40 contient une minéralisation, sans considération des autres facteurs prédictifs. Il fournit ainsi une première estimation du potentiel minéral global de la région.

## CHAPITRE 5 : : MODELISATION GEOMATIQUE

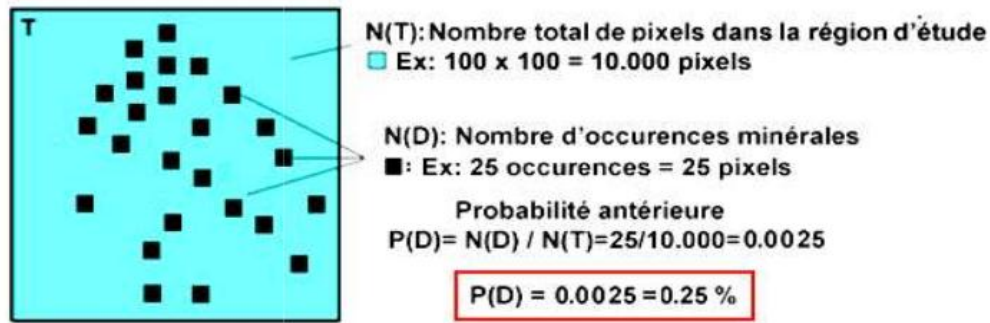


Figure 23 : sens physique de la probabilité antérieure

### 2.2 La probabilité postérieure

La probabilité postérieure constitue une mise à jour de la probabilité antérieure, intégrant de nouvelles informations appelées évidences. Ces évidences permettent de raffiner l'estimation de la présence des minéralisations en fonction de facteurs géoscientifiques spécifiques.

Dans l'exemple étudié, deux évidences géoscientifiques sont prises en compte :

**B** : représentant le magmatisme.

**E** : correspondant à la tectonique.

Ces éléments sont incorporés dans la modélisation sous forme de cartes prédictives binaires. Celles-ci sont utilisées pour recalculer une probabilité postérieure plus précise, conformément aux principes de la théorie de Bayes.

#### 2.2.1 Introduction du thème prédictif B

L'application du théorème de Bayes permet d'estimer la probabilité postérieure  $P(D|B)$ , qui représente la probabilité de l'occurrence minérale D, compte tenu de la présence de la condition B. Cette probabilité se formule comme "Probabilité de D sachant B", et peut être exprimée mathématiquement à l'aide de la relation suivante :

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

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

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

# CHAPITRE 5 : : MODELISATION GEOMATIQUE

Son dénominateur est:

$$P(B) = N(B) / N(T) \quad (2.3)$$

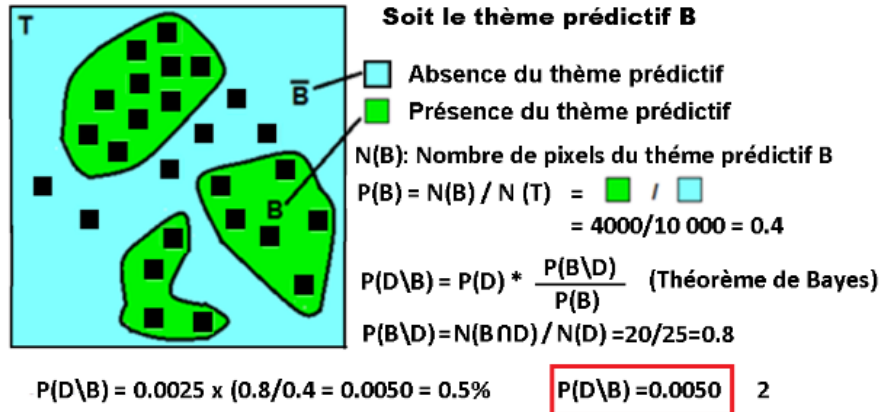


Figure 24 : probabilité postérieure de D étant donné la présence de l'évidence B

## 2.2.2 Introduction du thème prédictif E :

Examinons à présent un autre thème prédictif, E, qui concerne la tectonique. Ce thème couvre une surface de  $N(E) = 2500$  pixels et englobe 20 occurrences en son sein, tandis que 5 occurrences se situent en dehors (fig. 3).

L'application du théorème de Bayes à ce thème évidentiel E permet d'établir la relation probabiliste suivante :

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

$$P_{\text{Postérieure}} = P_{\text{antérieure}} * FMJ_E$$

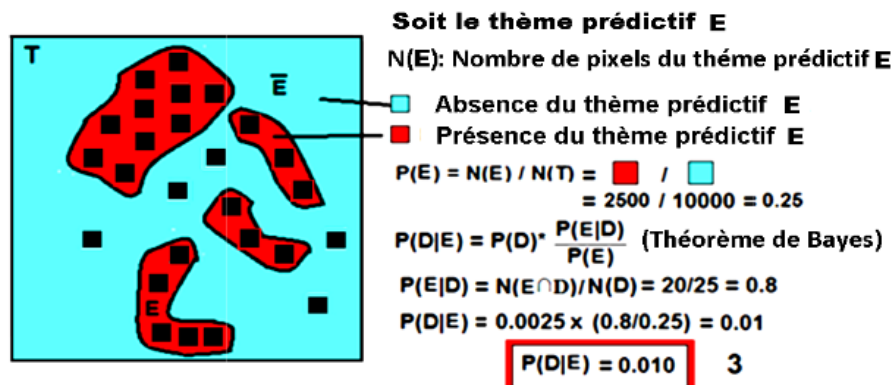


Figure 25 : probabilité postérieure de D sachant la présence de l'évidence E

## CHAPITRE 5 : : MODELISATION GEOMATIQUE

### 2.3. Calcul des paramètres statistiques WofE :

La méthodologie et le programme de calcul des paramètres statistiques Weights of Evidence (WofE), intégrés dans certains logiciels SIG comme MapInfo et ArcGIS, permettent d'obtenir l'ensemble des paramètres statistiques requis pour l'analyse spatiale. Les plus significatifs pour la modélisation WofE sont :

**A- Les Poids (Weights)** : Lorsque le facteur prédictif B est présent, on évalue le rapport entre la probabilité d'observer l'évidence B sous condition de présence de D, et la probabilité d'observer B sous condition d'absence de D, ce qui s'exprime sous la forme suivante :

$$\frac{P(B|D)}{P(B|\bar{D})} \text{ est } > 1$$

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

Et inversement, lorsque le thème prédictif introduit est absent, Ce même rapport

$$\frac{P(B|D)}{P(B|\bar{D})} \text{ est } < 1$$

Lorsque le Necessary Ratio (NR) est inférieur à 1, il représente le Rapport Nécessaire, utilisé pour caractériser la fiabilité d'un thème prédictif. Son logarithme naturel correspond au Poids négatif (W-), qui permet d'évaluer la diminution de l'association spatiale entre les évidences et les points d'entraînement. Ce poids négatif est définis par la formule suivante:

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

### B- Les Variances

Un deuxième type de paramètres statistiques WofE intégré dans la méthode des poids de l'évidence correspond aux variances. Pour chaque paire de poids  $W^+$  et  $W^-$ , les variances associées, notées  $S^2(W^+)$  et  $S^2(W^-)$ , sont systématiquement calculées afin d'évaluer la dispersion et la fiabilité des estimations.

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

## CHAPITRE 5 : : MODELISATION GEOMATIQUE

Elle représente l'écart type sur le poids positif  $W_+$

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

Elle représente l'écart type sur le poids négatif  $W_-$

### C- Le Contraste

Ce troisième paramètre statistique WofE joue un rôle essentiel dans la modélisation. Le contraste C représente la différence entre les poids calculés pour une évidence donnée et se formule ainsi :

$$C = (W_+ - W_-) \quad C = (W^+ - W^-)$$

Il sert à mesurer le degré d'association spatiale entre les points d'entraînement et les évidences utilisées.

- **Si  $C > 0$**  : L'association est positive, ce qui indique une forte correspondance.
  - **Si  $C < 0$**  : L'association est négative, impliquant une faible relation.
  - **Si  $C = 0$**  : Il y a une perte de données (*missing data*).
- Une valeur élevée de C traduit une forte association spatiale, tandis qu'une valeur faible suggère que l'évidence est moins pertinente pour la modélisation

### d- Le Studentized Contrast (Stud(C))

Lorsque plus de 20 points de contrôle sont disponibles (Carranza, 2004), on observe un maximum marqué du contraste C, ce qui facilite le reclassement de la carte prédictive. En revanche, un contraste C faible diminue la fiabilité du thème prédictif, nécessitant alors l'introduction d'un paramètre supplémentaire : le Studentized Contrast.

Ce dernier, aussi appelé "Confidence" dans ArcSDM, permet de mesurer la significativité statistique du contraste. Il est défini comme le rapport entre C et son écart-type  $s(C)$  et se formule de la manière suivante :

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

La modélisation par la méthode weight of evidence repose sur l'identification du thème-géoscientifique prédictif présentant la plus forte concentration de points d'entraînement. Plus le poids positif  $W_+$  est élevé et le poids négatif  $W_-$  est faible, plus le contraste  $c$  est important,

# CHAPITRE 5 : : MODELISATION GEOMATIQUE

traduisant ainsi une association spatiale renforcée entre les points d'entraînement et les évidences retenues. Par conséquent, le thème prédictif sélectionné est celui qui se révèle le plus cohérent et le plus robuste dans l'analyse.

## 3-Modélisation géomatique prédictive – Feuille de Tin felki (or)

### Étape 1 : Édification d'un SIG (format vecteur)

Cette étape a pour objectif de collecter, numériser, géoréférencer et vectoriser les données géoscientifiques relatives à la feuille de Tin Felki. Elle vise à constituer une base de données intégrant l'ensemble des couches d'informations essentielles à la modélisation prédictive, en particulier celles liées à la lithologie, à la tectonique, à la géochimie, à la géophysique ainsi qu'aux indices minéralisés répertoriés.

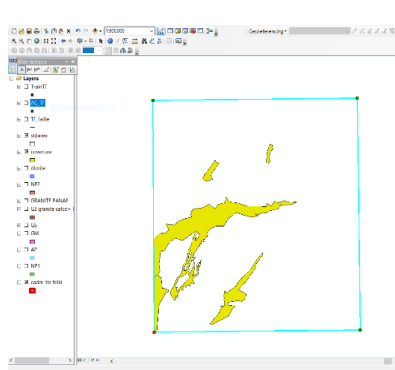


Figure 26 : couverture

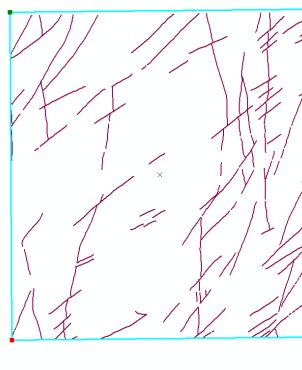


Figure 27 : faille

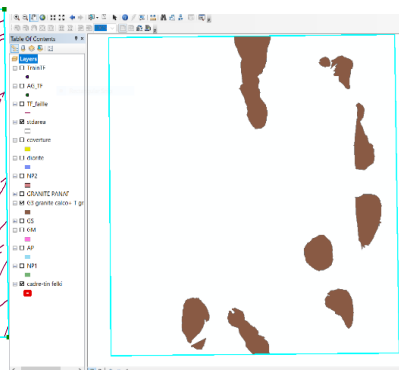


Figure 28 : granite de taourirrh

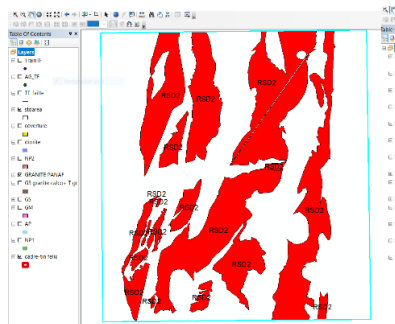


Figure 29 : granite panafricain

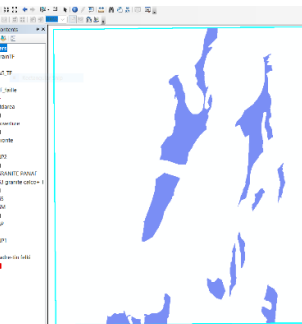


Figure 30 : diorite et gabbro

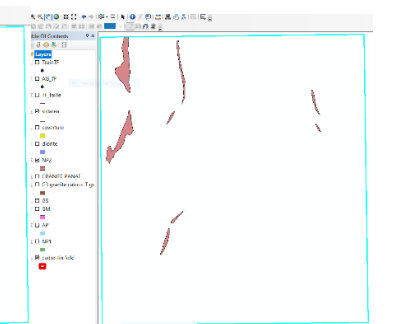


Figure 31 : NP supérieur

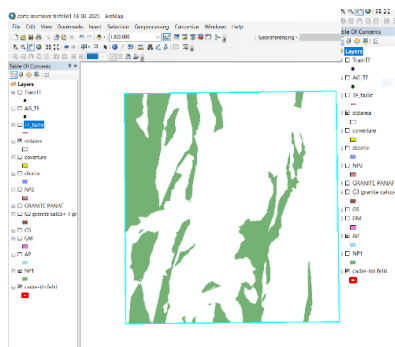


Figure 32 : NP inférieur

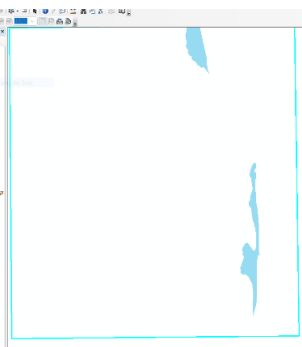


Figure 33 : formation de platform

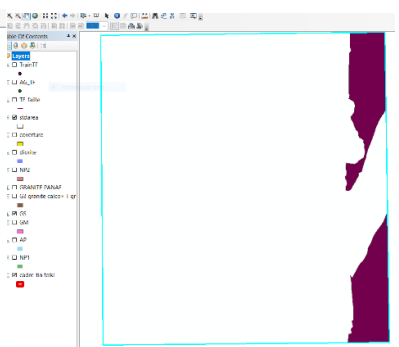


Figure 34 : Serie Aleksod (GS)

## CHAPITRE 5 : : MODELISATION GEOMATIQUE

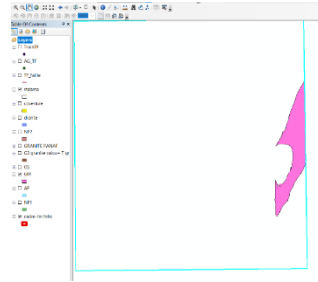


Figure 35 : série Arechchoum (GM)

### Etape 2 : Préparation de données à l'analyse

La préparation des données pour l'analyse (prétraitement) consiste à convertir l'ensemble des couches thématiques factorielles sélectionnées en cartes binaires (ou multiclassées), étape essentielle pour l'analyse par la méthode des poids de l'évidence (Weight of Evidence - WofE). Sur la base des données collectées, Harris et Sanborn-Barrie (2006) soulignent que des cartes de prédictivité minérale plus cohérentes sont produites lorsque de nombreuses cartes factorielles sont utilisées.

#### 2.1. Définition de Arc SDM dans le cadre d'ArcGIS

ArcSDM (Spatial Data Modeller) est un module complémentaire intégré à l'environnement ArcGIS, spécialement conçu pour la modélisation prédictive spatiale dans les domaines de l'exploration minière et de la géoscience. Cet outil permet de réaliser des analyses spatiales multicritères en intégrant différentes variables géoscientifiques sous forme de couches raster ou vecteur. ArcSDM repose sur des approches statistiques bayésiennes, dont la méthode du Weight of Evidence (WofE), qui attribue à chaque facteur spatial un poids exprimant son influence relative dans la probabilité de présence d'un gisement ou d'un indice minéralisé. Grâce à cette méthode, ArcSDM facilite la combinaison et l'interprétation objective de données géologiques, géochimiques, géophysiques et structurales, en produisant des cartes de potentiel minier destinées à orienter efficacement les travaux d'exploration. Dans le cadre de ce travail, ArcSDM sera utilisé pour la modélisation prédictive de l'or dans la région du Hoggar, précisément sur la feuille de Tin Felki, en exploitant la méthode Weight of Evidence afin de pondérer et croiser les différentes variables favorables à la minéralisation aurifère.

Cela nécessite de définir un projet MI-SDM, qui doit spécifier le masque de la zone d'étude, la taille de la cellule unitaire, les sites d'entraînement ainsi que l'ensemble des cartes d'évidence sélectionnées.

## CHAPITRE 5 : : MODELISATION GEOMATIQUE

### 2.3. Masque de la zone d'étude :

Dans la cartographie du potentiel minéral utilisant le modèle Weight of Evidence (WofE), les calculs cartographiques sont effectués sous forme raster. Il est donc essentiel de définir avec précision le masque de la « zone d'étude ». Le masque de la zone d'étude adopté pour ce projet est une couche de polygone correspondant au contour externe de la feuille de tin felki à l'échelle 1/200 000, délimitée par les coordonnées géographiques suivantes : longitude 4° - 5° et latitude 23° - 24°.

**2.4.-Taille de cellule unitaire :** La modélisation par la méthode Weight of Evidence (WofE) nécessite également de définir la taille de la cellule unitaire, qui correspond dans le cadre de notre projet à 1 cellule unitaire par km<sup>2</sup>. Cette valeur représente la résolution minimale des thèmes de Données (évidential thèmes) utilisés dans l'analyse. Pour plus de détails sur la méthodologie permettant de déterminer la résolution optimale de la cellule unitaire, il est recommandé de consulter Carranza (2009).

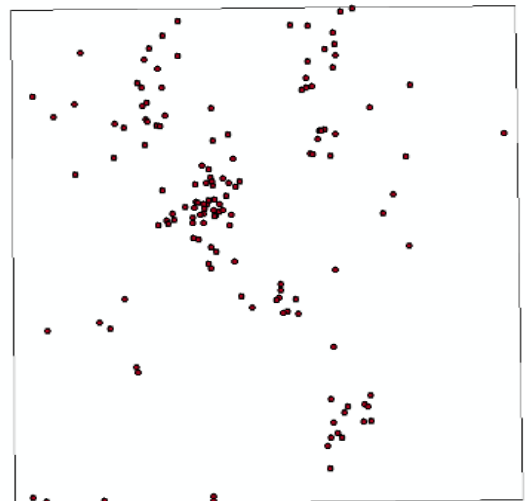
### 2.5. Sites d'entraînement (Training Sites)

Pour garantir une extrapolation spatiale fiable, il est essentiel que les points d'apprentissage sélectionnés présentent des caractéristiques géologiques similaires à celles des gisements ciblés (Fabbri et Chung, 2008). Le choix judicieux de ces sites d'apprentissage cohérents contribue significativement à améliorer la performance de la modélisation par la méthode du Weight of Evidence (Carranza et al., 2008).

En outre, la localisation spatiale des points d'apprentissage, déterminée à partir des valeurs de probabilité a posteriori, peut être exploitée pour identifier le

gisement-type (*typical deposit*), défini comme le gisement le mieux classé, c'est-à-dire celui présentant la valeur de probabilité a posteriori la plus élevée, et qui peut ainsi servir de référence en tant que point d'apprentissage représentatif (Raines et Bonham-Carter, 2006).

**-Cartes évidentielles prédictives :** Les cartes prédictives basées sur les évidences retenues pour l'étude sont : la carte lithologique, la carte tectonique et celle des anomalies géochimiques.



## CHAPITRE 5 : : MODELISATION GEOMATIQUE

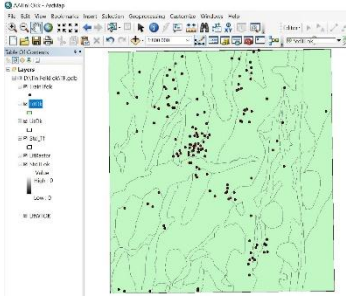


Figure 36 : carte lithologique

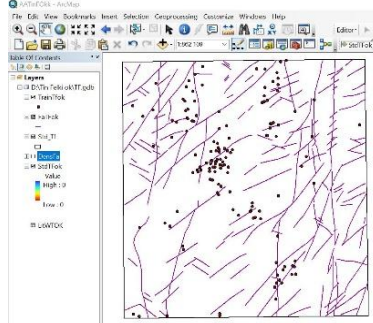


Figure 37 : carte Tectonique

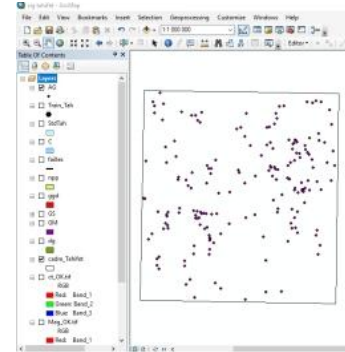


Figure 38 : carte d'Anomalies géochimiques

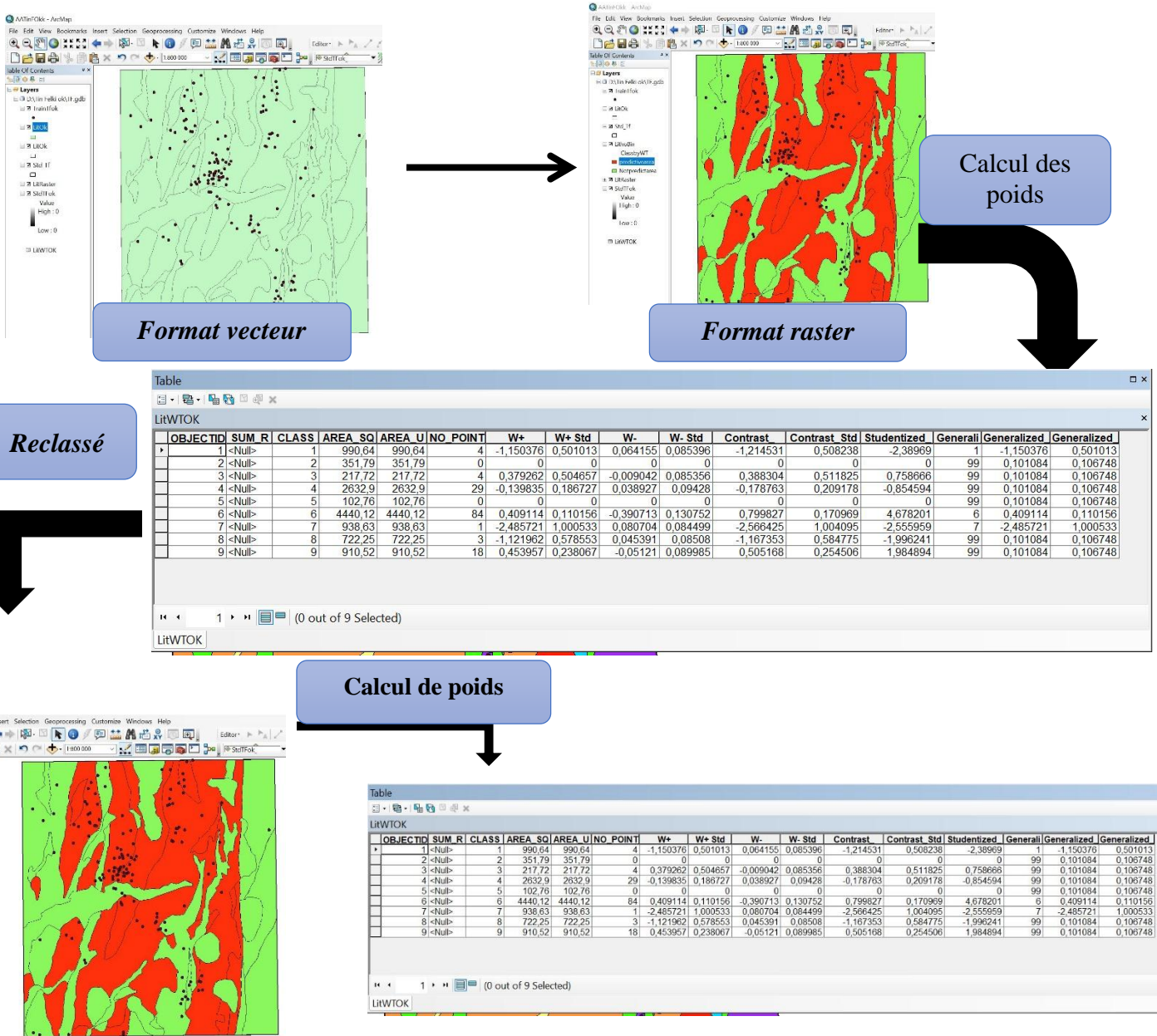
### Étape 3 : Analyse spatiale et création de carte prédictive binaire

**A -Analyse des preuves lithologiques :** Les évidences géologiques, issues principalement de la carte géologique, mettent en évidence neuf unités lithologiques aux caractéristiques distinctes, identifiées à partir des points d'entraînement. La carte prédictive binaire a été élaborée en cinq étapes

- Étape 1:** Extraction de la couche lithologique au format vecteur à partir du SIG.
- Étape 2:** Conversion de cette couche vecteur en format raster.
- Étape 3:** Calcul des poids des différentes classes lithologiques.
- Étape 4:** Reclassification de l'évidence lithologique en carte prédictive binaire, à partir de l'analyse des paramètres issus de la méthode des poids de l'évidence (WofE), notamment  $w^+$ ,  $w^-$ , le contraste et le studentized contrast.
- Étape 5:** Recalcul du poids de la carte binaire obtenue.

# CHAPITRE 5 : : MODELISATION GEOMATIQUE

➤ Les cinq étapes utilisées sont résumées dans le schéma suivant :



## B-Analyse des preuves tectoniques :

Étant donné le rôle déterminant des évidences structurales dans le contrôle de la mise en place des minéralisations, deux cartes prédictives binaires ont été dérivées à partir de la carte évidentielle prédictive des failles. L'analyse de ces évidences tectoniques a été conduite en suivant la même démarche méthodologique adoptée pour la carte lithologique. Le résultat de ce traitement est présenté dans la figure (39)

## CHAPITRE 5 : : MODELISATION GEOMATIQUE

Apartir dici il faudrait inspirer les cartes de tin felki

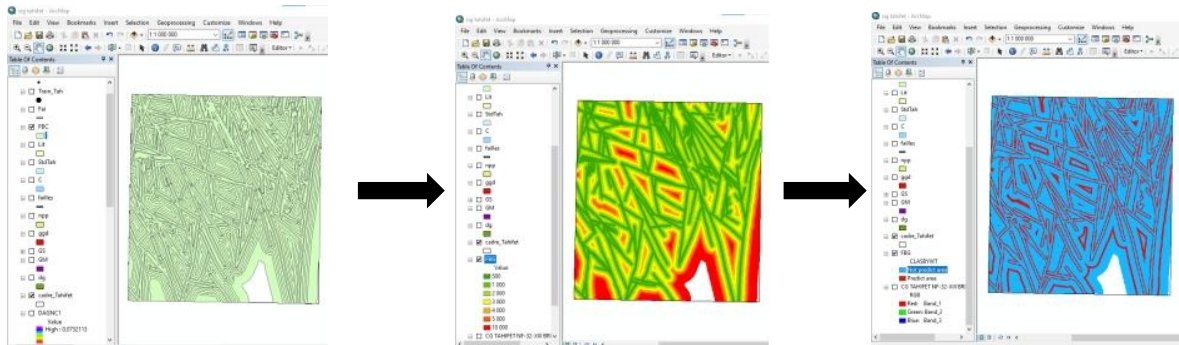


Figure 39 : création de la carte binaire « Proximité de faille »

Par la suite, à partir de la même carte évidentielle prédictive des failles, une carte binaire de la « densité de failles » a été générée, en appliquant également les mêmes étapes méthodologiques que précédemment. Le résultat obtenu est illustré dans la figure (40)

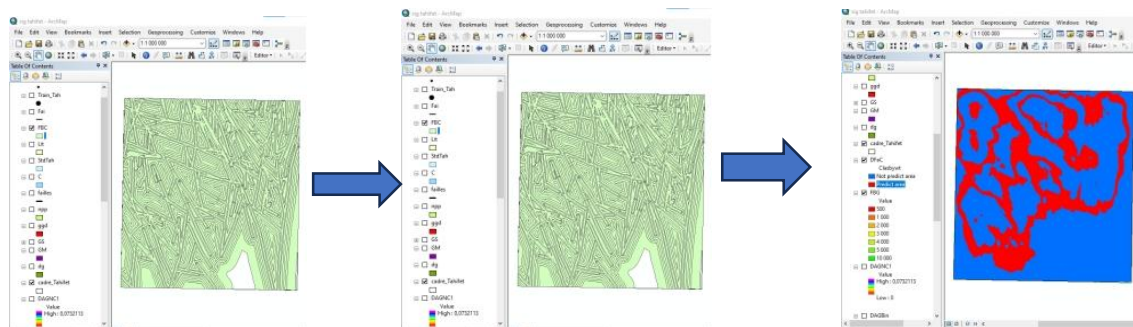


Figure 40 : création de la carte binaire « Densité de faille »

### C-Analyse des preuves des anomalies géochimiques :

Les minéralisations confirmées par les analyses chimiques ont également été intégrées dans le traitement par la méthode des Poids de l'Évidence (WofE). Cette couche a été élaborée à partir de 189 anomalies géochimiques prélevées dans la zone d'étude. Pour l'analyse de cette évidence, les mêmes étapes méthodologiques que celles appliquées aux évidences précédentes ont été suivies. »

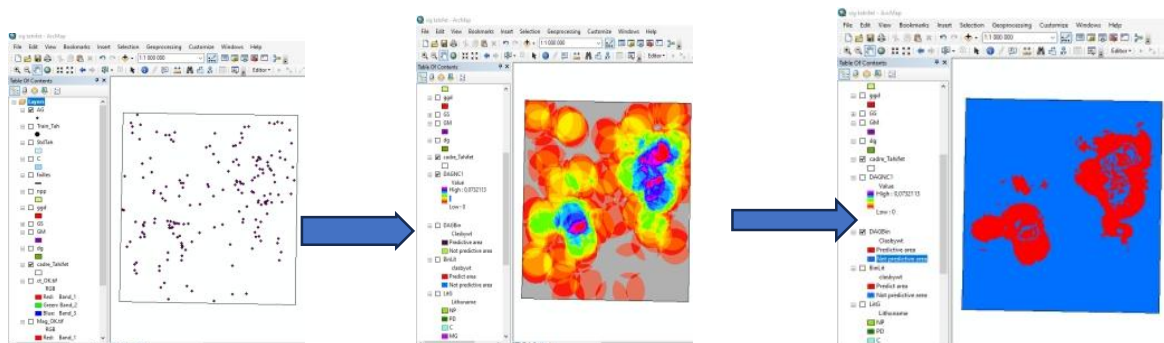
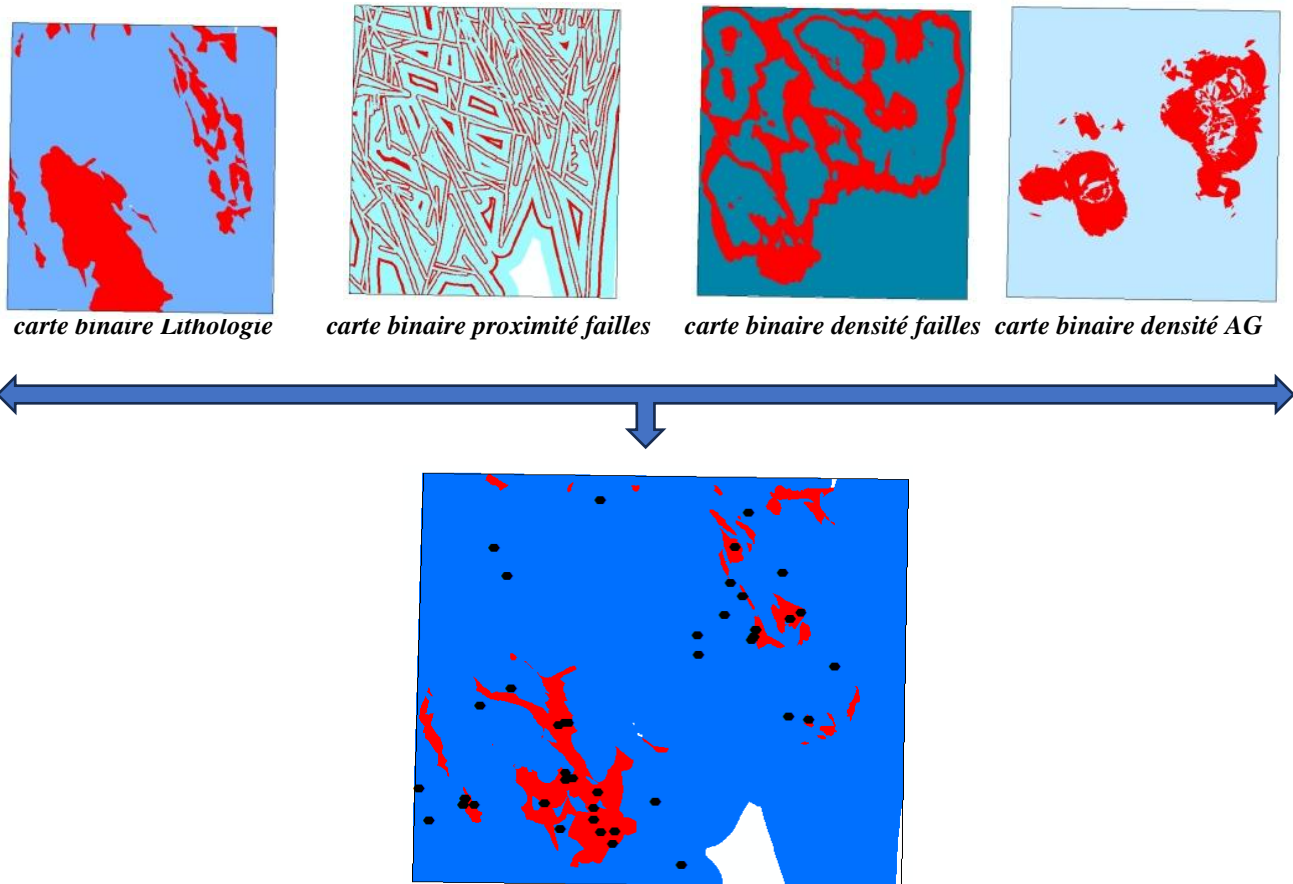


Figure 41 : création de la carte binaire « Anomalie géochimiques ».

## CHAPITRE 5 : : MODELISATION GEOMATIQUE

### D-combinaison des cartes binaires :

En combinant les cartes binaires dérivées des cartes évidentielles prédictives de la lithologie, de la tectonique et des anomalies géochimiques (AG), une carte binaire finale représentant le modèle prédictif initial du potentiel minéral a été générée. Cette carte a ensuite été soumise au test d'indépendance conditionnelle (CI), permettant d'ajuster le modèle et d'obtenir la carte finale du potentiel minéral corrigé fig. (42)



*Figure 42 : carte du potentiel minéral*

« Résultat de combinaison des cartes prédictives binaires et création de la carte du potentiel minéral »

- La carte du potentiel minéral obtenue représente, d'un point de vue mathématique, Une carte de probabilité structurée en deux classes distinctes. La première classe correspond aux zones à faible potentiel minéral (représentées en bleu), indiquant des secteurs faiblement prospectifs pour la recherche et l'exploration minière ultérieures. La seconde classe regroupe les zones à fort potentiel minéral (représentées en rouge), qui constituent les secteurs les plus favorables et prioritaires pour les futures recherches minières ciblant l'or dans la région de Tin Felki. Ces secteurs à fort potentiel apparaissent ainsi comme les cibles privilégiées pour les sociétés et compagnies d'exploration minière.

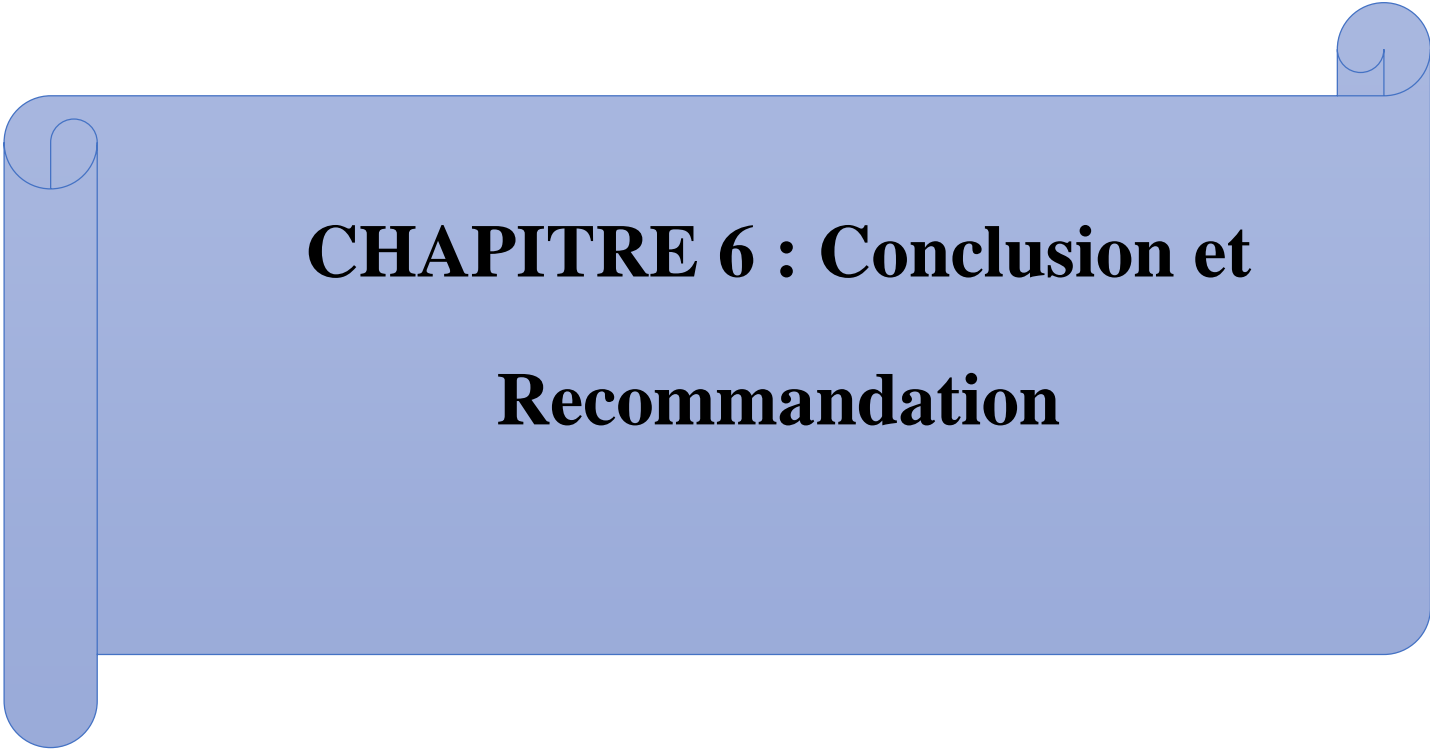
Cette carte permet également de réduire significativement les superficies à explorer, ce qui contribue directement à l'optimisation et à la réduction des coûts d'exploration. Elle met

## CHAPITRE 5 : : MODELISATION GEOMATIQUE

en évidence l'existence de deux grands secteurs perspectifs : le premier est localisé au sud-ouest de la carte, en relation étroite avec les minéralisations filoniennes (filons de quartz et greisen) associées aux granites migmatitiques, un contexte bien documenté dans le Hoggar. Le second secteur perspectif, quant à lui, se situe au nord-est de la feuille de Tin felki et se développe au sein des formations volcano-sédimentaires du Néoprotérozoïque, ce qui constitue une nouveauté et un fait peu habituel dans le contexte géologique régional

- Les points d'entraînement (Training Points) se concentrent majoritairement au sein où à proximité immédiate des zones à fort potentiel, ce qui confirme la validité et la robustesse du modèle prédictif utilisé pour l'élaboration de cette carte.
- Il convient également de noter que certaines zones à potentiel élevé ne présentent actuellement aucun indice minéral connu, ce qui peut s'expliquer soit par l'absence d'exploration antérieure, soit par le fait qu'aucune occurrence n'y a encore été identifiée. Ces secteurs, présentant un fort potentiel mais dépourvus de données disponibles, devraient être considérés comme des cibles prioritaires pour de futures campagnes d'exploration minière.
- Dans certains secteurs identifiés comme perspectifs, des minéralisations déjà découvertes (points d'entraînement) ont été recensées, tandis que d'autres zones restent dépourvues d'indices connus.

Cette situation suggère que les secteurs sans points d'entraînement ont été peu ou pas explorés jusqu'à présent. En conséquence, il est vivement recommandé d'orienter en priorité les futurs travaux d'exploration vers ces zones non investiguées, en particulier celles représentées en rouge et dépourvues de points d'entraînement, qui constituent des secteurs perspectifs nouvellement identifiés et susceptibles de receler des ressources minérales.

A blue scroll graphic with a light blue background and a darker blue border. The scroll is unrolled in the center, with the top and bottom edges curling upwards. The text is centered on the unrolled portion.

# **CHAPITRE 6 : Conclusion et Recommandation**

# CHAPITRE 6 : Conclusion et Recommandation

## Conclusion Générale

Ce travail de recherche, portant sur l'exploration de l'or dans la région de **Tin Felki (Hoggar)**, a permis de mettre en œuvre une approche méthodologique rigoureuse basée sur l'intégration et la combinaison de données multicritères au sein d'un Système d'Information Géographique (SIG). L'objectif principal était d'élaborer une **carte de potentiel minéral** capable d'orienter les futures campagnes d'exploration.

Les résultats obtenus, traduits par une carte prédictive binaire, mettent en évidence deux classes de probabilité distinctes :

1. **Une classe à faible potentiel (en bleu)**, couvrant les zones peu propices au ciblage immédiat.
2. **Une classe à fort potentiel (en rouge)**, identifiant les secteurs prioritaires pour l'exploration aurifère.

L'analyse spatiale a révélé deux pôles majeurs d'intérêt :

- **Le secteur Sud-Ouest** : Il confirme la fertilité du contexte géologique classique du Hoggar, marqué par des minéralisations filoniennes et des greisens liés aux granites migmatitiques.
- **Le secteur Nord-Est** : Sa mise en évidence constitue l'apport scientifique majeur de cette étude. Développé au sein de formations volcano-sédimentaires néoprotozoïques, ce secteur représente une **nouveauté géologique régionale**, ouvrant de nouvelles perspectives pour la compréhension des gîtes aurifères dans cette zone.

La robustesse du modèle prédictif est attestée par la forte corrélation entre les **points d'entraînement (indices connus)** et les zones à haut potentiel. De plus, l'identification de zones rouges dépourvues d'indices préalables valide l'efficacité de cette méthode comme outil de découverte. En somme, cette étude permet d'optimiser les stratégies d'exploration en réduisant considérablement les surfaces d'investigation, garantissant ainsi une réduction significative des coûts et des délais opérationnels.

## Recommandations

À la lumière des résultats obtenus par cette modélisation, nous formulons les recommandations suivantes pour les futurs travaux de recherche et les compagnies d'exploration minière :

### 1. Investigations de Terrain (Ground-truthing)

- **Prospection prioritaire au Nord-Est** : Organiser des missions de vérification sur le secteur Nord-Est afin de caractériser la nature des minéralisations au sein des formations volcano-sédimentaires.
- **Échantillonnage systématique** : Réaliser des levés géochimiques (sols et roches) sur les zones à fort potentiel nouvellement identifiées (zones rouges sans indices connus) pour confirmer les anomalies prédites par le modèle.

# CHAPITRE 6 : Conclusion et Recommandation

## 2. Approfondissement Géophysique et Structural

- **Levers haute résolution** : Effectuer des levés magnétiques et radiométriques aéroportés de haute précision pour mieux cerner les structures profondes (failles et zones de cisaillement) qui servent de drains aux fluides minéralisateurs.
- **Analyse structurale fine** : Étudier la relation entre la fracturation et la mise en place des filons dans le secteur Sud-Ouest pour préciser les guides structuraux de la minéralisation.

## 3. Optimisation du Modèle Prédictif

- **Intégration de nouvelles variables** : Affiner le modèle en y intégrant des données de géochimie de ruissellement ou des données de télédétection multispectrale de nouvelle génération pour mieux cartographier les altérations hydrothermales.
- **Approches hybrides** : Tester d'autres méthodes de combinaison (Logique Floue, Réseaux de neurones ou Random Forest) pour comparer leur sensibilité par rapport au modèle binaire actuel.

## 4. Stratégie d'Exploration Minière

- **Ciblage économique** : Concentrer les investissements sur les secteurs à "fort potentiel" pour maximiser les chances de découverte tout en minimisant les dépenses inutiles dans les zones à faible probabilité.
- **Mise à jour de la base de données** : Répertorier systématiquement tout nouvel indice découvert pour enrichir les "points d'entraînement" et réitérer le processus de modélisation de manière itérative

## Références bibliographiques

### 1. Ouvrages

**Bonham-Carter, G.F.**, 1994. *Geographic Information Systems for Geoscientists: Modelling with GIS*. Pergamon, Oxford, 398 p.

**Gass, I.G.**, 1977. *Structural controls on mineralization in the Hoggar*. Pergamon Press.

**Kroner, A.**, 1984. *Geochronology of the Hoggar shield: Archean to Pan-African events*. Elsevier.

### 2. Articles scientifiques

**Barbey, P., Bertrand, J.-M., et al.**, 1986. Analyse géochimique et prospective minérale au Hoggar central. *Revue Algérienne de Géosciences*, vol. X, p. 112–130.

**Bonham-Carter, G.F.**, 1989. Weights of evidence modeling: a new approach to mapping mineral potential. *Geological Survey of Canada Paper*, 89-9, p. 171–183.

**Carranza, E.J.M.**, 2004. Weights-of-evidence modelling of mineral potential: case study Abra, Philippines. *Natural Resources Research*, 13, p. 173–187.

**Carranza, E.J.M.**, 2009. Geochemical anomaly mapping: application of weights of evidence. *Ore Geology Reviews*, 35, p. 383–404.

**Carranza, E.J.M., et al.**, 2008. Integrated prospectivity mapping using Bayesian combinations. *Revue de Géosciences Appliquées*.

**Fabbri, A.G. & Chung, C.F.**, 2008. Spatial data fusion for mineral potential mapping. *Journal of Geomatics*.

**Raines, G.L. & Bonham-Carter, G.F.**, 2006. Predictive mineral potential modeling for northern Mexico. *Exploration Geophysics*.

**Zeghouane, H., Allek, K. & Kesraoui, M.**, 2016. GIS-based weights of evidence modeling for Sn–W–rare metals in Laouni area, Central Hoggar, Algeria. *Arabian Journal of Geosciences*, 9(5). DOI: 10.1007/s12517-015-2188-6.

### 3. Thèses et mémoires

**Alexandre, H.**, 2014. *Modélisation géologique du potentiel aurifère du Hoggar*. Mémoire de Master, Université d'Alger.

**Bellal, M.**, 1991. *Étude des granites Taourirth et pegmatites associées (Hoggar)*. Thèse de Magister, USTHB, Alger.

**Guerreiro, M.**, 2012. *Prospection aurifère et méthodes SIG au Hoggar*. Mémoire de Master, USTHB.

**Sautter, V.**, 1985. *Structure et géochimie des intrusions granitoïdes du Hoggar*. Thèse de Doctorat, Université de Grenoble.

**Sintchouk, Y.**, 1984. *Étude des anomalies géochimiques aurifères au Hoggar central*. Mémoire, USTHB.

### 4. Rapports

**Blinnikov, V., et al.**, 1991. *Inventaire et prospective des ressources minérales du Hoggar*. Rapport SONAREM, Alger.

**Caby, R.**, 1967. *Géologie et évolution géodynamique du Hoggar central*. Notes et Mémoires du C.R. Algérie.

**Caby, R.**, 1982. *Synthèse géologique du Hoggar central*. Rapport BRGM.

**Dautria, J.-M.**, 1988. *Étude géologique et géochimique de la région de Tin Felki (Hoggar)*. Rapport interne, USTHB.

**Latouche, L.**, 1972. *Cartographie géologique préliminaire du Hoggar*. Rapport BRGM.

**Lelubre, M.**, 1952. *Première synthèse géologique du Hoggar central*. Rapport ARMINES, Alger.

**Bertrand, J.-M. et Lasserre, M.**, 1972. *Évolution géodynamique de la ceinture panafricaine du Hoggar*. Notes et Mémoires C.R. Algérie.

**Bertrand, J.-M., et al.**, 1968. *Structure et pétrographie du Hoggar occidental*. Notes et Mémoires du C.R. Algérie.

**Girod, M.**, 1976. *Le massif volcanique de l'Atakor (Hoggar central) : étude pétrographique et structurale*. Notes et Mémoires du C.R. Algérie.

## **5. Sites Internet**

**Office National du Tourisme (O.N.T), Algérie**, consulté en 2025. *Données géographiques et touristiques du Hoggar*. Disponible sur: [www.ont.dz](http://www.ont.dz)