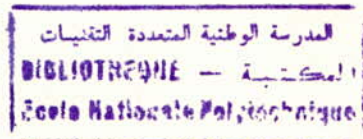


5/03

République Algérienne Démocratique et Populaire
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

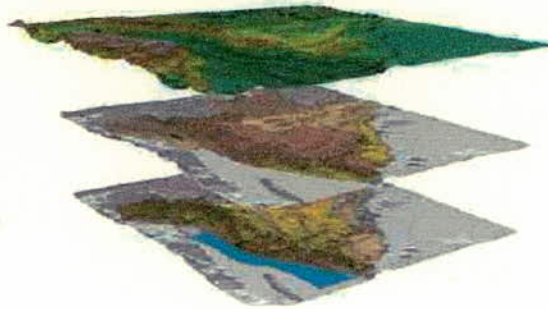
ECOLE NATIONALE POLYTECHNIQUE
DEPARTEMENT HYDRAULIQUE



Mémoire de fin d'étude
en vue de l'obtention du diplôme d'ingénieur d'état
en hydraulique

THEME

APPORT DES SIG DANS LA CONNAISSANCE
DES RESSOURCES EN EAU
APPLICATION A LA REGION DE
TAMANRASSET



Proposé par :
M^r A.SEMAR

dirigé par :
M^r SEMAR
M^r RAHMANI

présenté par :
M^r KIRATI WISSEM

Promotion : 2003

Ecole Nationale Polytechnique
10, Avenue Hassen Badi, El Harrach, Alger.

République Algérienne Démocratique et Populaire
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

ECOLE NATIONALE POLYTECHNIQUE
DEPARTEMENT HYDRAULIQUE

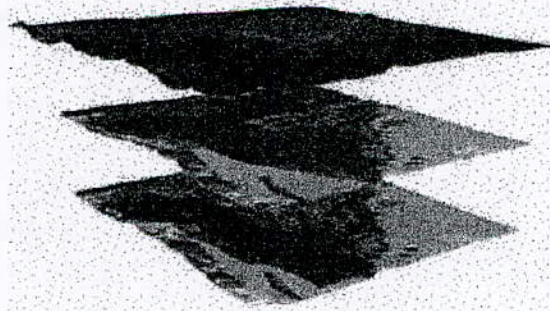


المدرسة الوطنية المتعددة التقنيات
المكتبة — BIBLIOTHEQUE
Ecole Nationale Polytechnique

Mémoire de fin d'étude
en vue de l'obtention du diplôme d'ingénieur d'état
en hydraulique

THEME

APPORT DES SIG DANS LA CONNAISSANCE
DES RESSOURCES EN EAU
APPLICATION A LA REGION DE
TAMANRASSET



Proposé par :
M^r A.SEMAR

dirigé par :
M^r SEMAR
M^r RAHMANI

présenté par :
M^r KIRATI WISSEM

Promotion : 2003

Ecole Nationale Polytechnique
10, Avenue Hassen Badi, El Harrach, Alger.

Dédicaces

المدرسة الوطنية المتعددة التقنيات
BIBLIOTHEQUE — المكتبة
Ecole Nationale Polytechnique

Tout d'abords je tiens à rendre hommage par le biais de ce modeste travail à mon Co promoteur Mr RAHMANI DJELLOUL ainsi qu'à mon oncle KIRATI TAYEB décédés lors du séisme du 21/05/2003

A....

Mon très cher père qui m'a toujours poussé vers l'avant,

ma tendre mère qui a toujours cru en moi,

ma sœur Zahra el oula qui ma été d'une aide précieuse,

ma sœur Afrah ,mon petit frère Med Amine ,

et mon adorable petite soeur Saoussene ,

Je tiens aussi à remercier tonton lakhdar, tata fouzia et leurs enfants

pour leurs aides précieuses.

A la fille que j'aime LTM, pour son aide morale durant ces années ;

Je leurs dédie mon modeste travail

Remerciements.

Au terme de ce travail, je tiens à présenter mes remerciements les plus sincères à mon promoteur M.SEMAR, pour ses précieux conseils tout au long de ce travail

Mes remerciements vont également à l'ensemble des enseignants du département Hydraulique, qui ont contribué à ma formation.

Je remercie les membres de jury qui m'ont honoré de leurs présences.

Je remercie pour la même occasion le personnels de la bibliothèque centrale pour leurs patiences et leurs tolérances, sans oublier « Ami Salah » ; ainsi que le personnel de la bibliothèque de l'ORGM..

Enfin je remercie tous mes amis pour leurs soutien morale avant et après le séisme du 21/05/2003 (Hamim, Yacine, Azzedine ,Nazim ,Souhila,Samia,Yassmina...sans oublier Omar et Bilel).

A tous ceux qui ont participé de loin ou de près à l'aboutissement de mon projet, je leurs dis :

MERCI, MERCI, MERCI...

Résumé

Le présent travail s'inscrit dans le cadre de l'étude pour expliquer la relation éventuelle entre la ressource en eau souterraine et les données géologiques ;

En utilisant la méthode de la cartographie axée sur les Systèmes d'Information Géographique (SIG) dans les régions arides et semi- arides voir le Hoggar en Algérie.

Mots clés :

Eau souterraine, SIG ,arides ,semi aride, cartographie,Hoggar,Algerie

Summarized.

This present work is registered in the bounds to how fund a relation ship between the ground water and the data geological.

We use the cartography based, on Geographical Information System (GIS), in arid area like Hoggar in Algeria.

Key words :

Ground water, data , geological, arid, area, GIS, cartography, Hoggar, Algeria...

ملخص

هذا العمل يسجل في إطار دراسة لتفسير العلاقة ما بين وجود المياه الجوفية و المعلومات الجيولوجية و هذا بطريقة فن رسم الخرائط باستعمال نظام المعلومات الجغرافية في المناطق شبه جافة و الجافة كمنطقة تمناست بالهقار

مفتاح الكلمات :

المياه الجوفية، معلومات جيولوجية، فن رسم الخرائط (Cartographie)، نظام المعلومات الجغرافية (SIG)، مناطق جافة، تمناست، هقار.

Table des matières



INTRODUCTION GENERALE

PARTIE 1 : SYNTHESE BIBLIOGRAPHIQUE

INTRODUCTION GENERALE

CHAPITRE 2 : présentation des SIG.

2.1. Rapport historique du SIG.....	1
2.2. Définition d'un système d'information géographique.....	2
2.3. Aspects technique des SIG.....	3
2.3.1. Quelques fonctions de base des SIG.....	3
2.3.2. Les composantes d'un SIG.....	4
2.4. Fonctions et caractéristiques d'un SIG.....	5
2.5. Comparaison des SIG avec d'autres systèmes informatiques.....	10
2.6. Concepts liés à l'Information Géographique.....	10
2.6.1. L'information non géographique.....	11
2.6.2. Définition d'une base de donnée.....	11
2.6.3. Système de gestion de base de donnée.....	11
2.6.3.1. Modèles de Système de Gestion de Bases de Données.....	12
2.6.4. Formats ou modèles de données : vecteurs et rasters.....	12
2.7. Descripteur topologique.....	15
2.8. Difficultés fondamentales des SIG.....	15
2.8.1. Avantages et inconvénients des SIG.....	15
2.9. Conclusion.....	16

CHAPITRE 3 : les eaux souterraines.

3.1. Qu'est-ce que l'eau souterraine.....	17
3.2. Différence entre eaux souterraines et eaux de surfaces.....	17
3.3. Avantages liés à l'exploitation des eaux souterraines.....	18
3.4. L'eau souterraine en mouvement perpétuel.....	18

CHAPITRE 4 : présentation de la région de Tamanrasset

4.1. Présentation générale de la région de Tamanrasset.....	20
4.2. Géologie.....	20
4.2.1. Schéma structurel d'ensemble.....	21
4.2.1.1. Le Hoggar central polycyclique.....	22
4.2.2. Les roches éruptives.....	22
4.2.3. Les roches volcaniques.....	22
4.3. Les accidents tectoniques majeurs.....	24
4.3.1. Les accidents méridiens.....	24
4.3.2. Les accidents 70 Est.....	24
4.4. Morphologie du massif.....	24
4.4.1. Mise en place du massif.....	24
4.4.2. Les différentes zones morphologiques.....	25
4.5. Les terrains susceptible d'être aquifères.....	27

4.6.	Le milieu fissuré.....	27
4.6.1.	Généralités.....	27
4.6.2.	Etat des connaissances.....	27
4.6.3.	Situation morphologique d'Amsel.....	27
4.6.4.	Les autres centres du Hoggar.....	28
4.7.	Constitution des écrans rocheux formant seuils.....	28
4.8.	Étude de dislocation.....	30
4.8.1.	A l'échelle de l'affleurement.....	30
4.8.2.	La carte des fractures.....	33
4.9.	Les possibilités d'infiltration par les fissures.....	35
4.9.1.	Sur les basaltes.....	35
4.9.2.	Sur les granites.....	35
4.9.3.	Les gneiss.....	36

CHAPITRE 5 : étude des bassins versants.

5.1.	Définitions.....	37
5.2.	Les différentes composantes d'un bassin.....	37
5.2.1.	Le bassin total.....	37
5.2.2.	Le bassin actif.....	37
5.2.3.	L'élément générateur d'écoulement.....	37
5.3.	Les bassins de la région de Tamanrasset.....	37
5.4.	Dynamique des bassins.....	38
5.5.	Indice de forme.....	41
5.6.	Les résultats.....	41
5.7.	Rôle de la LITHOLOGIE.....	43
5.7.1.	Facteurs favorables à l'infiltration.....	43
5.7.2.	Densité de drainage.....	43

CHAPITRE 6 : Hydrogéologie.

6.1.	Rappels d'hydrogéologie.....	46
6.2.	Qu'est ce qu'un aquifère.....	48
6.2.1.	Identification géologique de l'aquifère.....	48
6.2.1.1.	Surfaces limites d'un réservoir.....	48
6.2.1.2.	Structure du réservoir.....	49
6.3.	L'eau souterraine – un maillon essentiel dans le cycle hydrologique.....	49
6.4.	Origine des eaux souterraines dans le Hoggar.....	50
6.5.	Conditions hydrogéologiques de la région.....	51
6.6.	Conditions générales pour la présence d'aquifère.....	52
6.7.	hydro climatologie.....	52
6.7.1.	Climatologie.....	52
6.7.2.	Hydrographie et hydrogéologie de surface.....	56
6.7.2.1.	Structure du réseau hydrographique et des bassins versants.....	56
6.7.2.2.	Les écoulements superficiels.....	56

PARTIE 2 : MATERIELS ET METHODES

CHAPITRE 1 : présentation d'outils de travail

1.1. MapInfo Professional.....	59
1.2. Caractéristiques.....	59
1.3. MapInfo Professional 6.5	59
1.3.1. Les nouveautés de la version 6.5	59

CHAPITRE 2 : Modélisation numérique du terrain

2.1. Introduction.....	61
2.2. Historique	61
2.3. Les champs d'application de la modélisation numérique de terrain	62
2.3.1. La cartographie numérique	62
2.3.2. Les Systèmes d'Information Géographiques (SIG)	62
2.2.3. La géomatique	63
2.3.3. La foresterie	63
2.3.5. Le génie civil	63
2.3.6. L'hydrographie et la bathymétrie	63
2.3.7. La géologie et la géophysique	63
2.3.8. Le génie minier	64
2.3.9. La simulation et visualisation de terrain	64
2.2.10. le génie militaire.....	64
2.4. Définitions.....	64
2.4.1. Les Données Numérique d'Élévations (DNE).....	64
2.4.2. Les Modèles Numériques de Terrain (MNT)	65
2.4.3. Les Modèles Numériques de Surface (MNS)	65
2.5. Acquisition des données	65
2.5.1. Sources d'informations	65
2.6. Représentation matricielle ou vectorielle	66
2.7. Eléments d'une base de données vectorielle.....	69
2.8. Types de M.N.T	69
1)- M.N.T sous forme de grille régulière (raster)	70
2)- M.N.T sous forme de réseau irrégulier de triangulation (T.I.N) (vecteur).....	71
2.9. Choix entre Raster /vecteur.....	73
2.10. Informations dérivées	74

PARTIE 3 : ANALYSES ET INTRPRETATIONS

1. Méthodologie.....	77
1.1. la récolte des données.....	77
1.2. matériels et logiciels.....	77
1.3. documents utilisées.....	78
1.4. la scannérisation.....	78
1.5. la digitalisation.....	79
1.6. l'alphanumerisation.....	79
1.7. organisation de la base de données.....	79
2. les différentes combinaisons de couches.....	80
3 conclusion.....	81

Table des figures

PARTIE 1 : SYNTHESE BIBLIOGRAPHIQUE.

CHAPITRE 2 : présentation des SIG

Figure 2.1. Représentation des couches thématiques.....	2
Figure 2.2. Illustration simple de la fonction de croisement.....	4
Figure 2.3. Les composants matériels des SIG et leur fonctions.....	6
Figure 2.4. La relation entre les différents composants d'un SIG.....	7
Figure 2.5. Organigramme des fonctionnalités.....	9
Figure 2.6. Modèle vecteur et modèle raster.....	12
Figure 2.7. Le passage du modèle vecteur au modèle raster.....	13
Figure 2.8. La place des SIG dans les SI.....	14

CHAPITRE 4 : présentation de la région de Tamanrasset

Figure 4.1. Coupe géologique schématique du bouclier Targi.....	20
Figure 4.2 : Schéma structurel d'ensemble du massif.....	21
Figure 4.3 : Base de coulée basaltique lateritisée, dans l'oued Relatouai.....	23
Figure 4.4 : Esquisse morphologique (Hoggar central).....	26
Figure 4.5. : Coupe transversale E.W dans un « couloir clair » à In DALAG.....	29
Figure 4.6. : Situation de la source Tahahart (S.Chapuis).....	30
Figure 4.7 : situation de mesure de fissuration en surface.....	32
Figure 4.8 : Carte des fractures.....	34

CHAPITRE 5 : étude des bassins versants.

Figure 5.1 : Région de Tamanrasset carte des bassins versants.....	39
Figure 5.2 : Dynamique des bassins types d'hydrogrammes de crues.....	40
Figure 5.3 : Allure et densité du réseau hydraulique.....	45

PARTIE 2 : MATERIELS ET METHODES

CHAPITRE 2 : Modélisation numérique du terrain.

Figure 2.1 : un MNT sous forme de grille régulière.....	70
Figure 2.2 : un M.N.T sous forme de réseau de TINs.....	72
Figure 2.3 : surface représentée par des courbes isohypses (courbes d'égalité de valeurs).....	72
Figure 2.4. : Surface représentée par une grille triangulée (Triangulated GRID).....	73
Figure 2.5. : MNT TIN avec et sans les lignes de crêtes et les thalwegs.....	74
Figure 2.6. : les sources d'information d'un M.N.T.....	75

PARTIE 3 : ANALYSES ET INTERPRETATION

Fig. 1 : carte topographique + couche de la zone d'étude	
Fig. 2 : carte topographique + couche du réseau hydrographique.	
Fig. 3 : réseau hydrographique, et le positionnement des différents forages ainsi que la base de donnée des forages.....	83
Fig.4 : réseau hydrographique, une partie de la couche géologique, les différents forages ainsi q'une partie de la base de données de la couche géologique.....	84
Fig.5 : réseau hydrographique et une carte thématique.....	85
Fig.6 : couche de réseau hydrographique, une carte thématique, couche de forage et une couche de fissuration.....	86

Liste des tableaux

CHAPITRE 2 : présentation des SIG.

Tableau 2.1. Avantages et inconvénients du modèle vecteur et du modèle raster 13

CHAPITRE 5 : étude des bassins versants..

Tableau 5.1 : Valeurs de l'indice de GRAVILIUS sur quelques bassins..... 42

Tableau 5.2 : Densité de drainage en fonction des faciès géologiques..... 44

CHAPITRE 6 : Hydrogéologie.

Tableau 6.1 : capacité des grands réservoirs d'eau à la surface de la terre..... 46

Tableau 6.1: volume d'eau stocké dans les réservoirs souterrain des grands continents..... 47

Tableau 6.2: écoulement total naturel moyen et écoulement souterrain dans les grands continents..... 47

Tableau 6.4 : Températures moyennes mensuelles (°C)..... 53

Tableau 6.5 :Histogramme de précipitation (Djanet, Illizi)..... 54

Tableau 6.6 : Histogramme de précipitation (Assekremt, Tamanrasset)..... 54

Tableau 6.7 : Fréquence des mois de crues à Tamanrasset..... 57

Tableau 6.8 : caractéristiques de quelques crues connues à Tamanrasset..... 57

المدرسة الوطنية المتعددة التقنيات
BIBLIOTHEQUE — المكتبة
Ecole Nationale Polytechnique

PARTIE 1
SYNTHESE BIBLIOGRAPHIQUE

INTRODUCTION GENERALE [26]

Sans eau, il n'y a pas de vie. Le sol est le support des activités humaines. De ce fait, le développement économique de nombreux pays commence par la maîtrise de l'eau et la sécurisation foncière.

L'eau et le sol sont valorisés au travers des activités humaines, et l'on peut considérer ces deux composantes du territoire comme deux ressources naturelles indispensables et complémentaires au développement des populations. La durabilité de la valorisation de l'eau et du sol par l'homme exige toutefois un préalable essentiel : la caractérisation précise de ces ressources qui rend possible ensuite l'identification des droits qui leur sont associés. Des réformes foncières sont actuellement en cours dans de nombreux pays émergents. Des réformes et des lois sur l'eau voient le jour dans quelques pays.

Beaucoup d'experts s'accordent à penser que l'eau sera l'un des problèmes les plus critiques des pays en voie de développement au début du 21^{ème} siècle. La conférence des Nations Unies sur l'environnement et le développement, tenue en 1992 à Rio de Janeiro, soulignait déjà la nécessité d'adopter une approche équilibrée et durable pour la gestion de cette ressource naturelle. Une convention internationale sur l'eau pourrait en définir le cadre.

UN BESOIN D'INFORMATION FIABLE, OBJECTIVE, ET ACTUALISEE SUR L'EAU

Face à la croissance des besoins en eau pour ses utilisations domestiques, agricoles et industrielles, les commissions chargées de légiférer, les organismes chargés de déterminer des plans d'action, de rechercher de nouvelles ressources en eau, de définir les stratégies d'aménagement, d'assurer la gestion et le suivi de la qualité des eaux, ont besoin de données précises et à jour. Or, les données existantes sont rarement exhaustives, elles ne sont pas toujours facilement accessibles ou disponibles, elles sont souvent obsolètes. Au cours des dernières années, pour répondre à ce besoin réel et pressant d'information, des « bases de données eau » ont été mises en place au niveau régional, national et international. Elles sont issues le plus souvent d'approches statistiques et de mesures directes prises à partir d'un nombre limité de stations ponctuelles, et n'ont pas toujours la référence spatiale adaptée aux besoins des législateurs, des aménageurs, des gestionnaires, des décideurs.

Aujourd'hui, les satellites d'observation de la Terre constituent une source d'information précieuse sur cette composante du territoire qu'est l'eau, et le développement des systèmes d'information géographique (SIG) permet de donner aux bases de données sur l'eau la dimension spatiale indispensable. Nous décrivons ici au travers de quelques exemples d'utilisation des images satellitaires comme source d'information sur l'eau.

SOURCE D'INFORMATION SUR L'EAU (SPOT)

SPOT est un satellite lancé principalement pour fournir des cartes satellites de la terre et c'est ce qu'on appelle des **spatiocartes**.

Nous distinguerons deux types d'informations fournies par SPOT sur l'eau :

- une information directe (sur les eaux de surface)

- une information sur l'eau déduite d'autres informations thématiques qui lui sont liées, dans le cadre d'une approche systémique (sur les eaux souterraines, sur les variables intermédiaires de caractérisation de l'eau)

Les informations fournies par Spot répondent à plusieurs besoins : détection de la ressource, inventaire cartographique, suivi temporel, qualité et pollution, études préalables aux aménagements, maintenance des aménagements.

INVENTAIRE DES EAUX DE SURFACE : LES SPATIOCARTES SPOT

L'inventaire consiste à localiser, quantifier et qualifier les eaux de surface. Elle concerne aussi bien le réseau hydrographique que les plans d'eau.

Les spatiocartes Spot (éditées au 1 : 100 000, au 1 : 50 000 ou au 1 : 25 000) fournissent la référence cartographique exhaustive et actualisée sur de vastes territoires pour la délimitation des surfaces immergées et le calcul de surfaces correspondantes, la bathymétrie, le transport de matériaux en suspension.

Leur nature numérique les rend très facilement intégrables dans les bases de données géoréférencées, à la fois comme fond de référence cartographique, et comme source d'information thématique.

LA RECHERCHE DE RESSOURCES EN EAU SOUTERRAINE

L'inventaire des ressources en eau est mené la plupart du temps par les autorités régionales ou nationales, au travers des services de gestion des ressources naturelles. La recherche de zones à nappes d'eau souterraine potentielles peut être considérée comme un premier inventaire qui conduit à des applications telles que l'identification de linéaments et de végétation en zones arides, la localisation de points de forage dans les zones fracturées, l'évaluation de la recharge en eau dans les bassins sédimentaires.

De telles études concernent généralement de grands territoires, et l'échelle d'étude varie entre le 1\500 000 pour les inventaires, et le 1\20 000 pour l'identification de points de forage.

Les techniques traditionnelles (de géologie, pédologie, hydrologie, météorologie) et les techniques de télédétection sont complémentaires. On a souvent recours à l'utilisation de couvertures aériennes stéréoscopiques en dernière étape (accès aux points de forages). Les images satellites utilisées sont LANDSAT MSS (bandes 7,5,4) ou les images SPOT (multi spectrales, panchromatiques, ortho images et MNT dérivés). Les principales techniques sont :

- l'analyse visuelle pour l'identification d'unités de paysages (relations étroites entre la végétation pérenne et les fractures), l'extraction de réseaux de drainage et d'irrigation, la délimitation de bassins versants à partir de MNT existant ou dérivés de couples stéréoscopiques SPOT ;

- l'analyse détaillée structurale complétée par des observations de terrain (identification de direction des contraintes, fractures, fissures, décrochage et jonction du réseau);

- l'analyse statistique des linéaments;

- l'intégration dans un SIG pour combiner l'imagerie satellite et les données exogènes conventionnelles.

La bonne fiabilité de ces méthodes est confirmée par un fort taux de succès de forage (supérieur à 70%), des vitesses moyennes de production dans les normes acceptables, une qualité de l'eau conforme aux standards de potabilité.

CHAPITRE 2
Présentation des SIG.

2.1. Rappel historique du SIG [32], [34], [35].

L'origine des Systèmes d'Information Géographique remonte au début du développement de la cartographie. Il s'agirait de la deuxième moitié du 18ème siècle époque à laquelle apparaissent les premières cartes à grande précision.

Pendant les années 60 et les années 70, de nouvelles pratiques accordèrent une place croissante à l'utilisation des cartes pour la gestion des ressources naturelles. Suite à la prise de conscience de l'interrelation entre les différents phénomènes qui se déroulent à la surface de la terre, la nécessité de développer des outils de gestion global et pluridisciplinaire, s'est rapidement imposée. A l'époque la seule manière de confronter des informations issues de cartes distinctes consistait à tracer des calques et par ce biais d'essayer d'identifier les zones les plus favorables, en tenant compte de l'ensemble des informations de base.

Cette technique a été alors adaptée au système informatique encore à ses débuts. Des cartes statistiques, volontairement simplifiées ont été reportées sur des feuilles blanches quadrillées. Les valeurs de cette grille ont été utilisées par superposition de caractères pour obtenir un effet visuel de nuance de gris représentant les valeurs statistiques de chaque cellule. Cette méthode n'a jamais été adoptée par les cartographes, compte tenu de la grossièreté des représentations cartographiques qui en découle.

A la fin des années 70, la technologie de cartographie assistée par ordinateur avait fait néanmoins de grands progrès, avec la disponibilité de plus d'une centaine de systèmes sur le marché. En parallèle, de nouvelles techniques se développaient dans des domaines proches: pédologie, hydrographie, topographie, photogrammétrie et télédétection. Le rythme soutenu du développement de ces nouvelles techniques, ainsi que l'absence de maturité de ce secteur s'est traduit dans un premier temps par la duplication d'efforts, dans des disciplines proches sans une réelle concertation. Mais au fur et à mesure que les systèmes se multipliaient et que l'expérience se gagnait, le potentiel de lien entre les processus différents de traitement des données spatiales émergeait. C'est ainsi que naissait un nouveau domaine : celui des systèmes d'information géographique, universellement utilisé de nos jours.

Au début des années 80, alors que l'informatique devenait à la fois plus sophistiquée (par la miniaturisation et l'augmentation des capacités de calcul), et plus populaire (par l'apparition des ordinateurs à des prix abordables), les SIG profitaient de cette généralisation des plateformes informatiques. Aujourd'hui, les SIG sont utilisés par tous les acteurs de l'aménagement du territoire, au sein d'administrations publiques, de laboratoires de recherche, d'établissements scolaires, d'industries privées et d'utilités publiques.

Le premier SIG automatique utilisé est le système d'information géographique canadien qui a été développé spécialement pour l'agence de développement et de réhabilitation de l'agriculture. Il avait pour but de faire l'inventaire des terres du Canada.

Les SIG constituent un système complexe de hardware et de software qui requiert une expertise dans les sciences géographiques, informatique et les systèmes d'engineering.

Cependant, ils ont de plus en plus facilité la gestion des divers projets au quotidien. En effet, au Canada pionnier en matière de SIG, on parle déjà d'une nouvelle spécialité **la géomatique**.

2.2. Définition d'un Système d'Information Géographique. [1], [2], [3], [34].

Le terme "Système d'information géographique" (SIG) désigne un système de stockage, de traitement et d'analyse de données, spécifiquement conçu pour traiter conjointement l'information graphique et attributive. Les données spatiales sont généralement sous forme de couches d'information issues de carte thématique (voir la figure ci-dessous), qui peuvent décrire entre autres: la topographie, la disponibilité en eau, la nature du sol, le couvert végétal, le climat, la géologie, la population, la propriété foncière, les bornes administratives ou bien encore les infrastructures (route principales, voies ferrées, réseau électrique, etc.).

Le croisement de couches thématiques, issues de cartes différentes, est l'une des fonctionnalités essentielles d'un SIG.

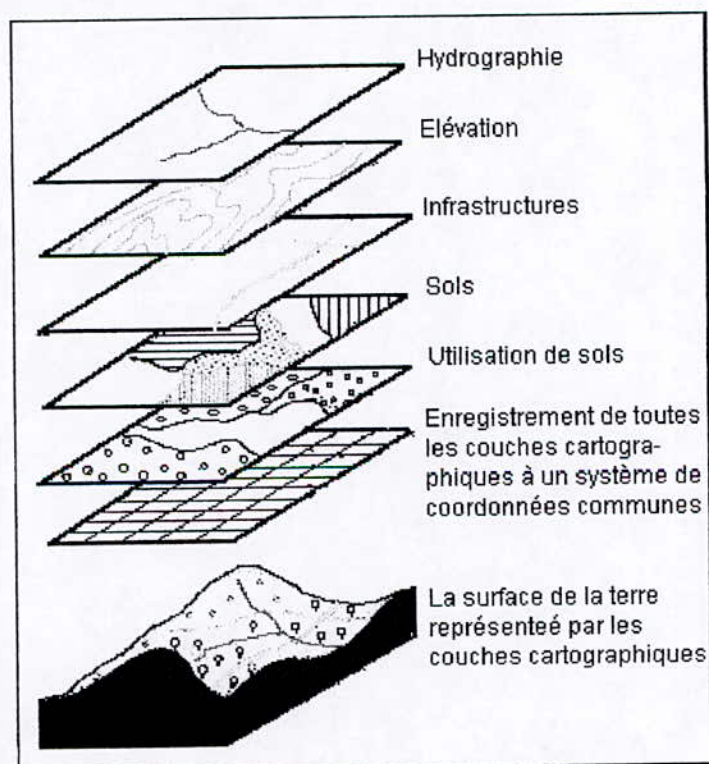


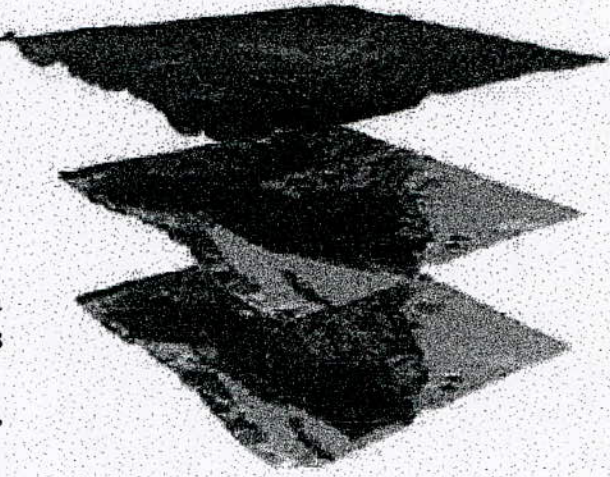
Figure 2.1 : représentation de couches thématique.

2.3. Aspects techniques des SIG

2.3.1. Quelques fonctions de base des SIG

Le SIG est essentiellement un outil qui facilite l'intégration de données diverses, et qui permet de les transformer selon des formats compatibles, de les croiser, de les analyser et enfin d'afficher le résultat de ces analyses sous forme cartographique. Les fonctionnalités de base des SIG sont les suivantes :

- production de cartes synthétiques, à différentes échelles, et selon différents systèmes de projections
- changement d'échelle, de projections, de légendes, d'annotations, etc.
- extraction de cartes issues du croisement de plusieurs informations et qui représente l'ensemble des attributs issus des cartes de base. Cette fonction est illustrée par le schéma 3, ci-dessous. La carte de la page précédente fournit un exemple de résultat de ce croisement : cette carte de synthèse illustre conjointement les zones climatiques du golfe du Bengale, ainsi que les périodes de croissance végétative. Elle fournit de ce fait une carte d'aptitude des territoires au développement d'une culture donnée.
- création de zones tampon ou de proximité, correspondant à la distance par rapport à des objets graphique de type linéaire ou surfacique. Cette technique est utilisée notamment pour la recherche de zones favorables à une distance donnée de réseaux de communication (voies ferrées, autoroutes, routes, etc.) ou de ressources hydriques (fleuves, canaux d'irrigation). Ces zones tampons peuvent alors être utilisées dans de nouveaux croisements.
- requête de type spatiale ou attributaire, ou conjointe (quels sont les parcelles présentant une aptitude au développement d'une culture X, qui sont situées à moins de Y kilomètres d'une ressource en eau, et qui possèdent un ensoleillement supérieur à Z heures par jour en moyenne).



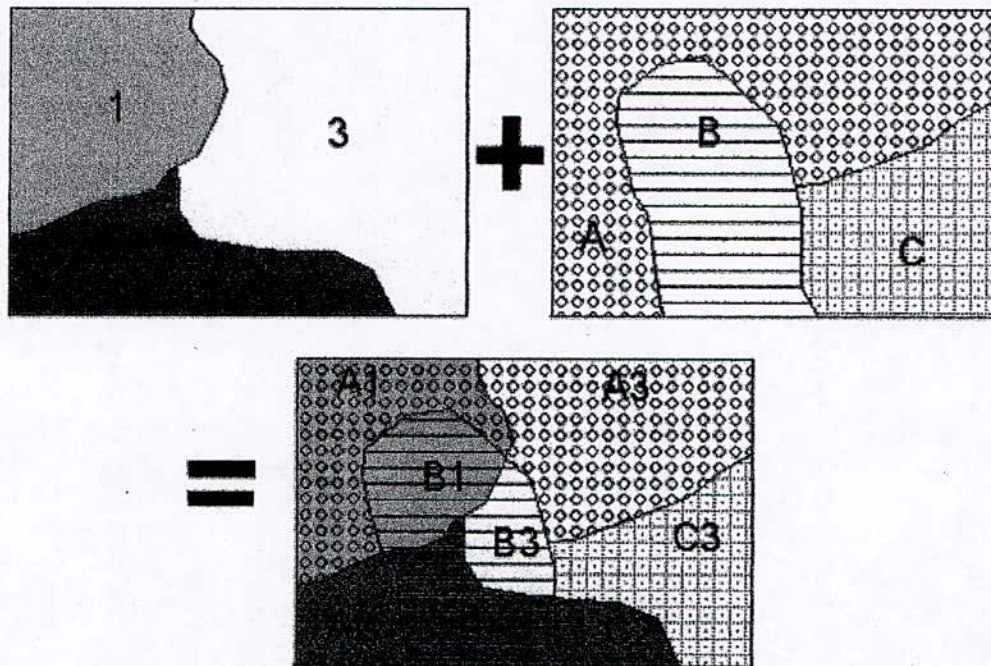


Figure2.2 : Illustration simple de la fonction de croisement. Une carte avec trois polygones (zones) et 3 classes, à savoir 1, 2 et 3 est recouverte avec une autre carte contenant, elle aussi, 3 polygones et 3 classes A, B et C. La couche résultante de croisement contient 8 polygones avec les noms de classe suivants : A1, A2, A3, B1, B2, B3, C2 et C3.

2.3.2. Les composantes d'un SIG

Un Système d'Information Géographique est constitué des composantes principales suivantes :

*Les logiciels

Au sens large le SIG comprend de nombreux logiciels qui gèrent les données géographiques et les données descriptives qui sont attachées.

Le SIG intègre de nombreux programmes qui constituent le système. Ces programmes offrent les outils et les fonctions pour le stockage et l'analyse de toutes les informations. Les principaux composants logiciels d'un SIG sont :

- Outils pour saisir et manipuler les informations géographiques.
- Systèmes de gestion de bases de données.
- Outils géographiques de requête, analyse et visualisation.
- Interface graphique pour une utilisation facile.

***Les données**

La qualité des données est d'une importance primordiale. Il existe de nos jours des normes internationales qui offrent des solutions complètes pour la gestion de la qualité.

***Le matériel**

Les SIG fonctionnent sur :-

- Ordinateurs utilisés de façon autonome.
- Ordinateurs de bureaux connectés en réseau.
- Des serveurs de données aux ordinateurs de bureaux

Les scanners permettent la numérisation sous différents formats de papiers (A0, A1, ..., A4). Pour les sorties, les imprimantes et les tables traçantes sont d'un usage courant.

La relation entre les différentes composantes d'un SIG est illustrée sur la Fig.

2.4. Fonctions et caractéristiques d'un SIG

Afin de réaliser les différentes opérations que l'on attend d'un SIG, celui-ci possède différentes fonctionnalités : Acquisition, Archivage, Analyse et Affichage.

Mais avant de réaliser ces opérations, on doit décider de la manière dont on va représenter ou modéliser l'espace géographique étudié, ce qui amène à réaliser une première opération appelée « Abstraction »

Ces cinq caractéristiques (fonctionnalités) des SIG (Abstraction, Acquisition, Archivage, Analyse et Affichage), sont commandement agrégées sous le sigle : « 5A ».

1- Abstraction

Action de séparer par la pensée. Selon DESHAYES et CHERY (2000), en ce qui concerne le SIG, l'abstraction est nécessaire pour rendre le monde modélisable. Exemple : le relief peut être représenté par des courbes de niveau, ou par un modèle numérique de terrain. Cette abstraction dépend du but poursuivi, se traduisant par le choix des données à prendre en compte par les différentes structurations.

2- Acquisition (Entrée des données)

C'est la collecte de l'information, première étape une fois le modèle de donnée est choisi. L'acquisition comprend :-

- La saisie des données graphiques par la numérisation automatique ou la digitalisation. Les données géographiques sont numérisées et géoréférencées, ou bien importées d'autres systèmes non intégrés.
- Saisie des données descriptives manuellement par le clavier. Les informations préexistantes doivent comporter des précisions sur leur production (date, origine, mode de calcul).
- Entrée des données par récupération des fichiers de données.

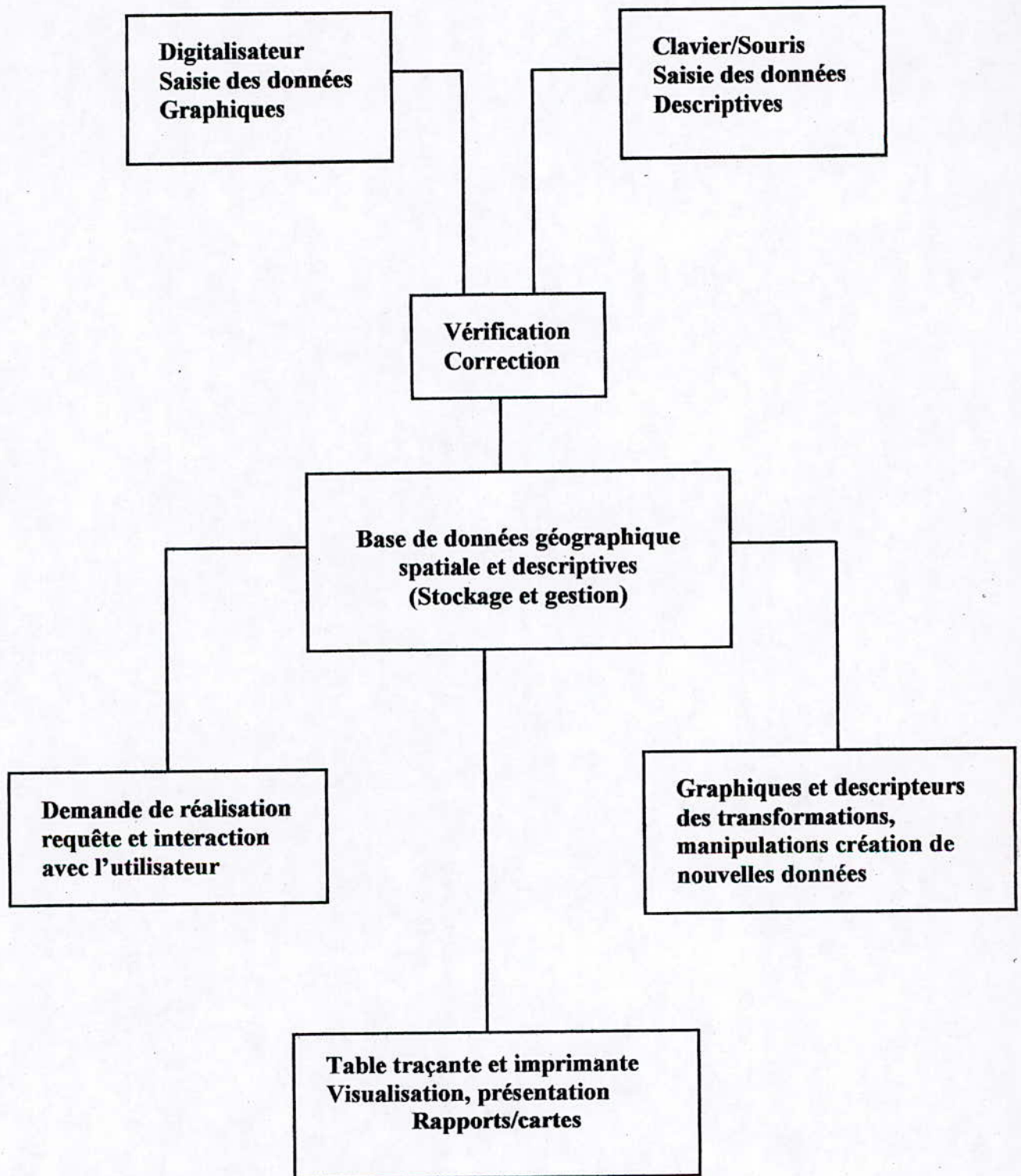


Figure 2.3. : Les composants matériels d'un SIG et leurs fonctions

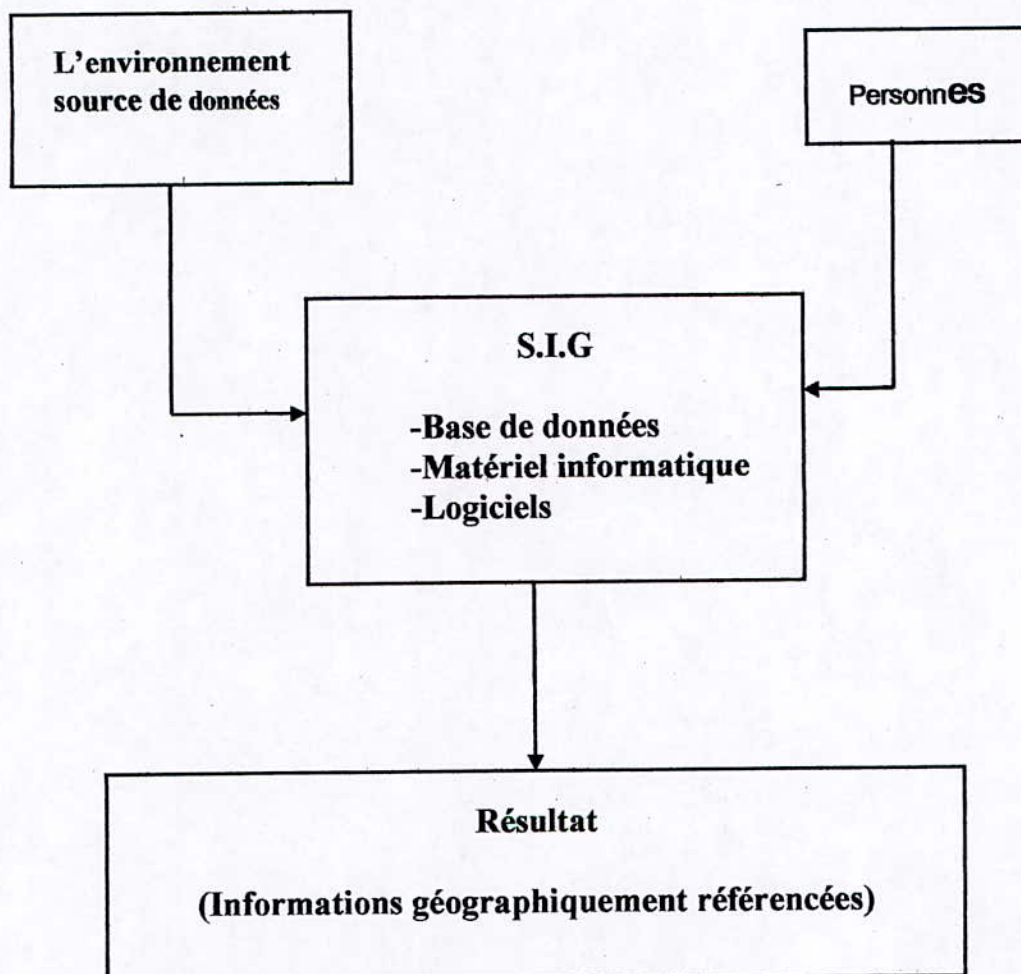


Figure 2.4 : La relation entre les différents composants d'un SIG

Les contraintes d'acquisition de l'information sont liées à la nature et à l'organisation des sources d'information.

3- Archivage (Gestion des données)

Consiste en le stockage, la gestion, la mise à jour et l'extraction des données. L'archivage efficace est celui qui permet l'organisation et l'accès rapide à l'information : l'organisation se fait par le schéma Conceptuel de Données ou SCD, tandis que l'accès à l'information passe par l'opération de sélection, en accédant à des requêtes structurées par le langage SQL (de l'anglais : Structured Query Language, langage d'interrogation structuré)

4- Analyse spatiale

L'accès à l'information rend possible des traitements spécifiques sur les objets sélectionnés. Certains de ces traitements se fondent directement sur la base de données sans utilisation d'attributs de localisation. L'analyse comprend l'interprétation de l'information, la mesure de l'espace et l'analyse statistique.

5- Affichage (Restitution)

C'est la restitution de l'information spatialisée, sélectionnée et analysée, par la représentation des résultats de l'analyse sous forme de cartes imprimées, tableaux de données, des figures ou des graphes.

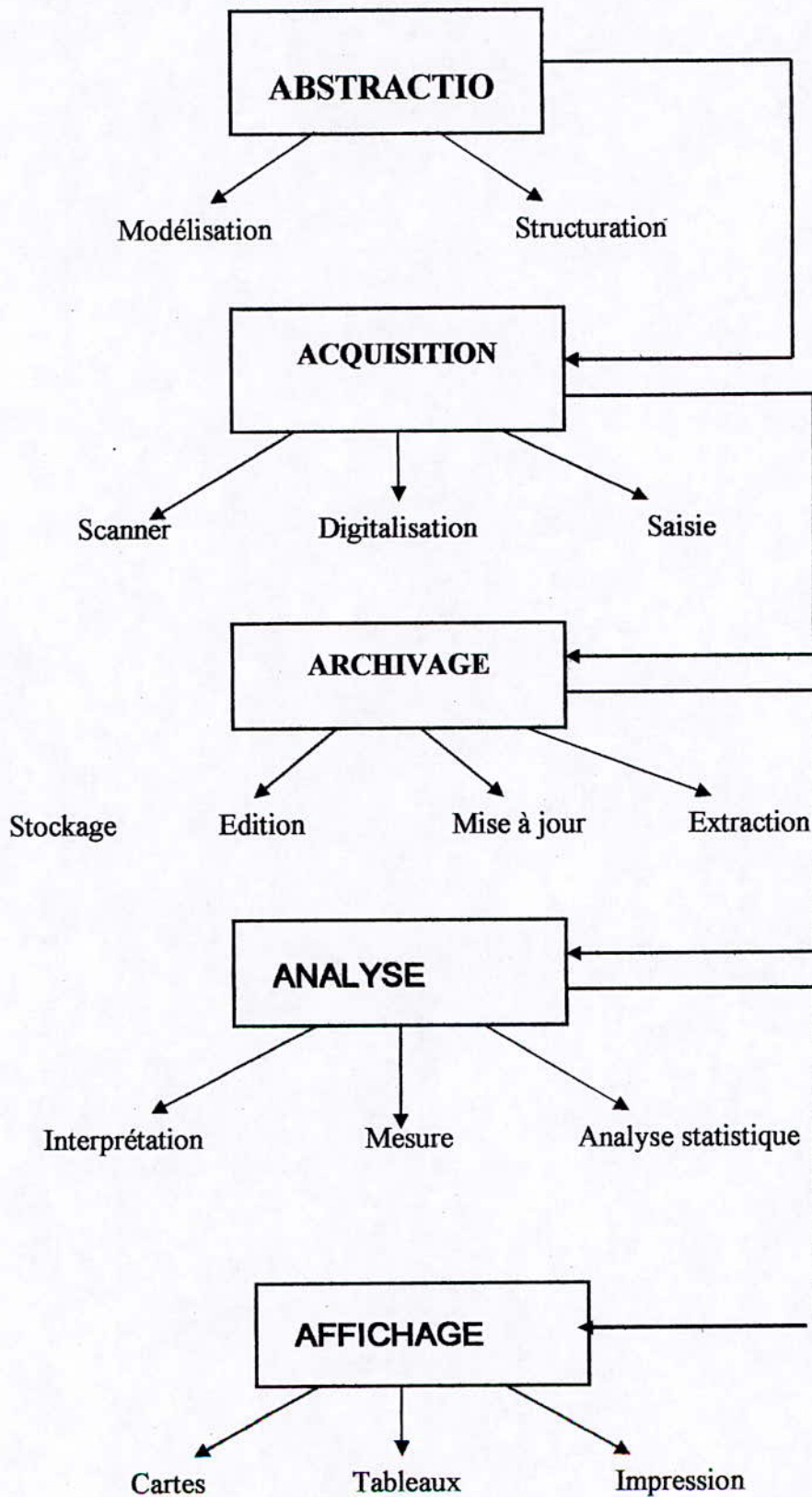


figure2.5 : Organigramme des fonctionnalités d'un SIG

2.5. Comparaison des SIG avec d'autres systèmes d'information [5], [6], [36], [37]

Fondamentalement, un SIG est un système de gestion de base de données (SGBD) spécifiquement conçu pour le traitement simultané des données spatiales et attributaires. Un système de gestion de base de données fournit généralement un langage d'analyse des données qui permet à l'utilisateur d'interroger le système sans tenir compte, ou presque, des mécanismes ou des méthodes qu'il utilise. Un système de gestion de base de données doit également contenir des procédures de vérification de la cohérence de ces données. Il doit permettre le maintien de leur intégrité et faciliter leur mise à jour.

En plus d'un SGBD, un SIG possède également un certain nombre de fonctions analogues à la cartographie automatisée. Toutefois, outre une grande capacité de traitement graphique, le SIG doit aussi être capable de traiter à la fois des attributs non graphique tels que les données statistiques et les données spatiales correspondantes. Par exemple, si l'utilisateur modifie les données spatiales, le SIG modifiera automatiquement la base de données attributaires pour refléter ces changements. Ce lien entre les deux types de données définit à lui seul l'appartenance d'un système au domaine des SIG.

Le SIG n'est pas un SGBD, ni un système infographique, ni un système de cartographie automatisé; en réalité, c'est tout à la fois car il permet d'intégrer tous ces autres systèmes en un seul.

Parmi les principales sources de données géographiques utilisées par un SIG, sont les informations relatives au globe terrestre obtenues par la télédétection. Il s'agit en général d'images numérisées ou de photographies aériennes, qui sont le résultat de procédures dénommées "traitement d'image". Une fois que ces images ont été géométriquement corrigées, améliorées, analysées et interprétées, les résultats peuvent être inclus dans un SIG et intégrés avec d'autres bases de données géographiques.

2.6. Concepts liés à l'Information Géographique [35], [36], [37]

L'information géographique est constituée de trois descripteurs permettant la modélisation du monde réel et le développement de diverses applications d'un SIG :

- « **Descripteur Sémantique** » de l'information descriptive représentant des données **non graphiques**
- « **Descripteur Géométrique** » de l'information géographique, représentant la localisation d'un objet par ses coordonnées géographiques, sa forme et ses dimensions.
- « **Descripteur topologique** » de l'information sur les relations entre les différents objets.

2.6.1. L'information non graphique

Ce concept est lié aux concepts de Base de Données (BD) et de Système de Gestion de Base de Données (SGBD).

2.6.2. Définition d'une Base de Donnée [25]

Une Base de Donnée (en Anglais : Data Base, DB), est une collection de données dans un domaine particulier où les relations sémantiques entre ces données sont spécifiques par des concepts de modèles de données sous-jacent.

L'expression « Base de Données » a reçue des acceptations diverses. Le glossaire de cartographie appel BD un « ensemble de fichiers relatifs à un thème déterminé et associée à un logiciel permettant leur entretien et leur utilisation efficaces (CFC : Comité Français de Cartographie,

Autre définition une base de données « est un ensemble d'informations hétérogènes, structurées, organisées et évolutives, susceptible de répondre rapidement et sélectivement aux besoins d'une application.

2.6.3. Système de Gestion de Base de Données

C'est une collection de logiciels permettant de créer, de gérer et d'interroger d'une manière efficace une base de donnée indépendamment du domaine d'application.

Le SGBD ou DBMS (Data Base Management Système), permet :-

- ✓ L'accès aux données ;
- ✓ L'accès aux informations par plusieurs utilisateurs, en fournissant différents langages selon le profil de ces dernières ;
- ✓ -La manipulation des données présentes dans une base de donnée ;
- ✓ -Gestion des données pouvant atteindre plusieurs milliards d'octets ;
- ✓ -Répondre à des requêtes par un niveau de performance adapté.

Un SGBD doit présenter d'autres fonctionnalités, telle que :

- -Fonctionnalités de DAO (Dessin Assisté par Ordinateur) pour l'acquisition des données cartographiques
- -Fonctionnalités d'organisation des données géographiques dans une cohérence à la fois fonctionnelle et géométrique.
- -Restitution des données sous formes cartographiques.

2.6.3.1. Modèles de Système de Gestion de Base de Données (modèles logiques) (Tableau.)

Ils représentent la manière dont les données sont organisées dans les fichiers. Les SGBD sont classés en quatre modèles principaux :

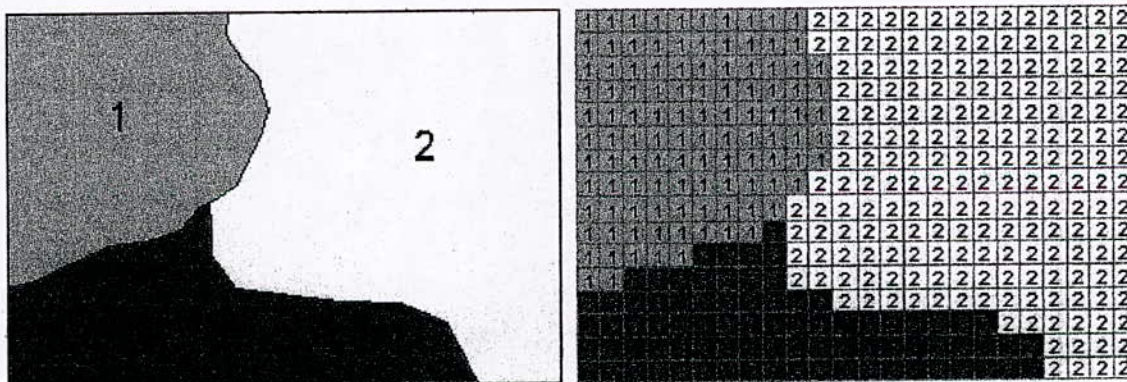
- Modèle hiérarchique.
- Modèle réseau
- Modèle relationnel.
- Modèle orienté objet.

Le modèle le plus utilisé actuellement est le modèle relationnel, car la gestion de base de données relationnelles est assurée par la plus part des SGBD des SIG tel que le Mapinfo.

Un modèle de données est une représentation abstraite de l'information et des opérations de gestion de l'information. Ce modèle motive souvent le choix de l'utilisateur d'une base de données, il est spécifié par l'utilisation des données codées et stockées en mémoire et par des programmes déterminant la façon dont ces données peuvent résoudre le problème posé.

2.6.4. Formats ou modèles de données : vecteurs et rasters

Au sein d'un SIG, le monde réel est représenté généralement à partir de l'un des deux grands modèles de données suivants : le modèle vecteur ou le modèle raster.



Modèle vecteur : l'ensemble des objets sont représentés à partir de points, lignes ou surfaces, définies en coordonnées réelles (X, Y). Chaque ligne étant définies par une succession de points appelés vecteurs, et chaque surface étant définie par les arcs qui tracent ses limites.

Modèle raster ou maillé : le monde réel est représenté par une succession régulière de cellules, selon un maillage défini. A chaque cellule est associée une valeur donnée.

Figure 2.6 : modèle vecteur et modèle raster.

La plupart des SIG a la capacité de transformer les données d'un format à l'autre. Les figures suivantes illustrent le passage d'une représentation selon le modèle vecteur, vers le modèle raster :

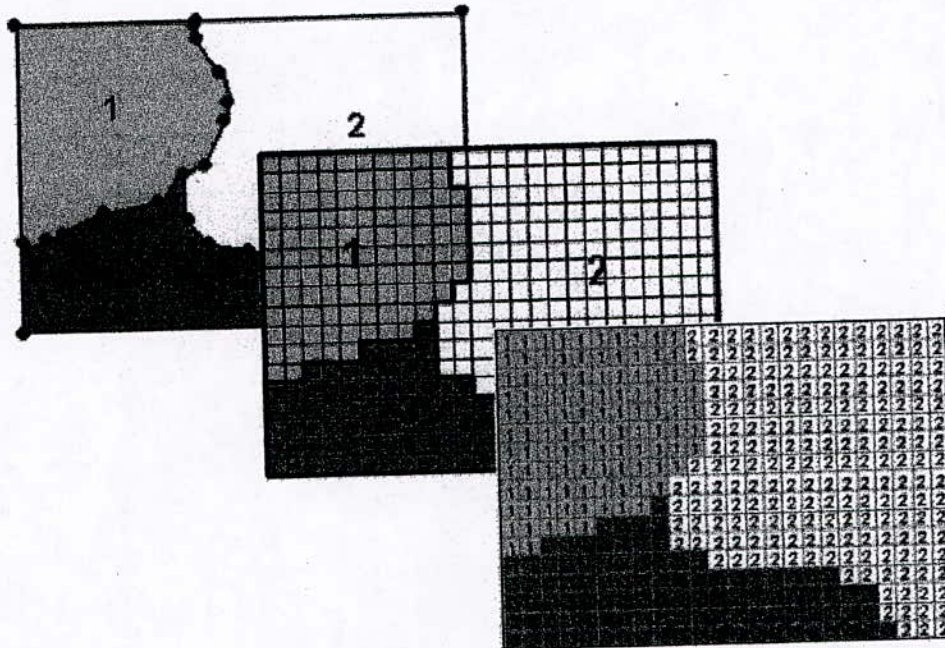


Figure 2.7 : Le passage du modèle vecteur vers le modèle raster

Chaque modèle a ses propres avantages et inconvénients :

	Avantages	Inconvénients
Raster	<ul style="list-style-type: none"> • Il est plus facile d'écrire des programmes pour traiter les données • Modèle assurant une meilleure compatibilité avec les données maillées telles que images satellitaires numériques • Meilleure compatibilité avec certaines sorties du type traceurs à jet d'encre ou terminaux graphiques 	<ul style="list-style-type: none"> • Requiert beaucoup de mémoire pour des bases de données contenant beaucoup d'attributs • Difficultés à représenter exactement les lignes (lignes topographiques, route, chemins de fer, etc.) à moins que la taille de la cellule soit petite. • Nécessité de disposer d'un dispositif de conversion vecteur raster pour intégrer des données vecteur (ex: banque de données topographique nationale)

Vecteur	<ul style="list-style-type: none"> • Beaucoup moins de mémoire requise • Possibilité de représenter la carte dans sa résolution initiale • Possibilité de représentation d'attributs multiples. 	<ul style="list-style-type: none"> • Les fonctions spatiales d'analyse sont beaucoup plus complexes • Certaines données de variable continues (ex: altitude, images satellitaires) ne peuvent être représentées sans traitement préalable (classification ou discrétisation)
----------------	----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------	------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------

Tableau 2.1 : avantages et inconvénients du modèle vecteur et du modèle raster.

Et pour bien situer les SIG au milieu des systèmes d'information voici un organigramme décrivant la typologie des SIG :

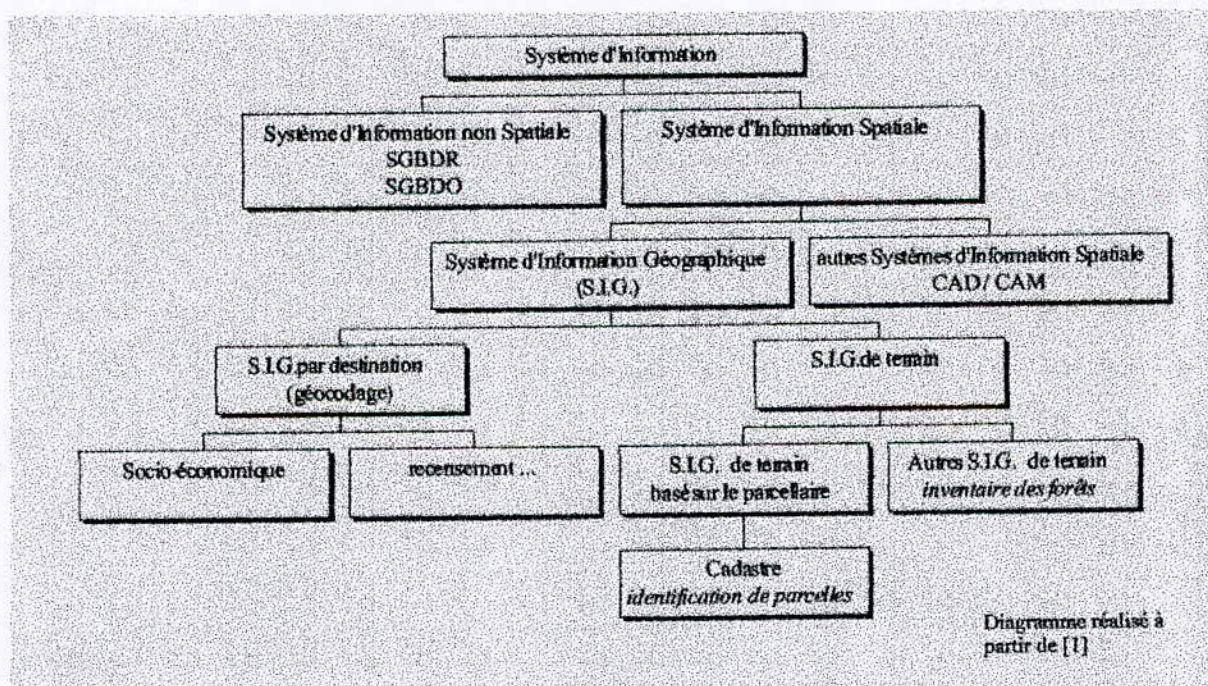


Figure 2.8. La place des SIG dans les SI.

2.7. Descripteur topologique [35],[37]

La topologie est une branche des mathématiques, elle concerne la relation entre objets dans le plan (espace) telle qu'elle est conservée par homéomorphisme (déformation sans déchirement) du plan

La topologie permet de gérer les erreurs de construction des éléments de la base de données : point ou arcs doubles, polygones non fermés..., par le codage des relations spatiales. Elle permet aussi d'organiser les données en couches d'informations facilement superposables par exemple : un paysage peut être décomposé en différents thèmes qui vont déterminer des couches d'informations, encore appelées couvertures

2.8. Difficultés fondamentales des SIG

Malgré leur utilisation et leur performance actuelle dans de nombreux domaines d'activité, le SIG relèvent un certain nombre de difficultés rencontrées dans leur utilisation depuis leur création jusqu'à nos jours :

- Techniques difficilement maîtrisables.
- Utilisation des langages spécifiques.
- Dispersion ou manque de données graphiques

2.8.1. Avantages et inconvénients des SIG

1/ Avantages

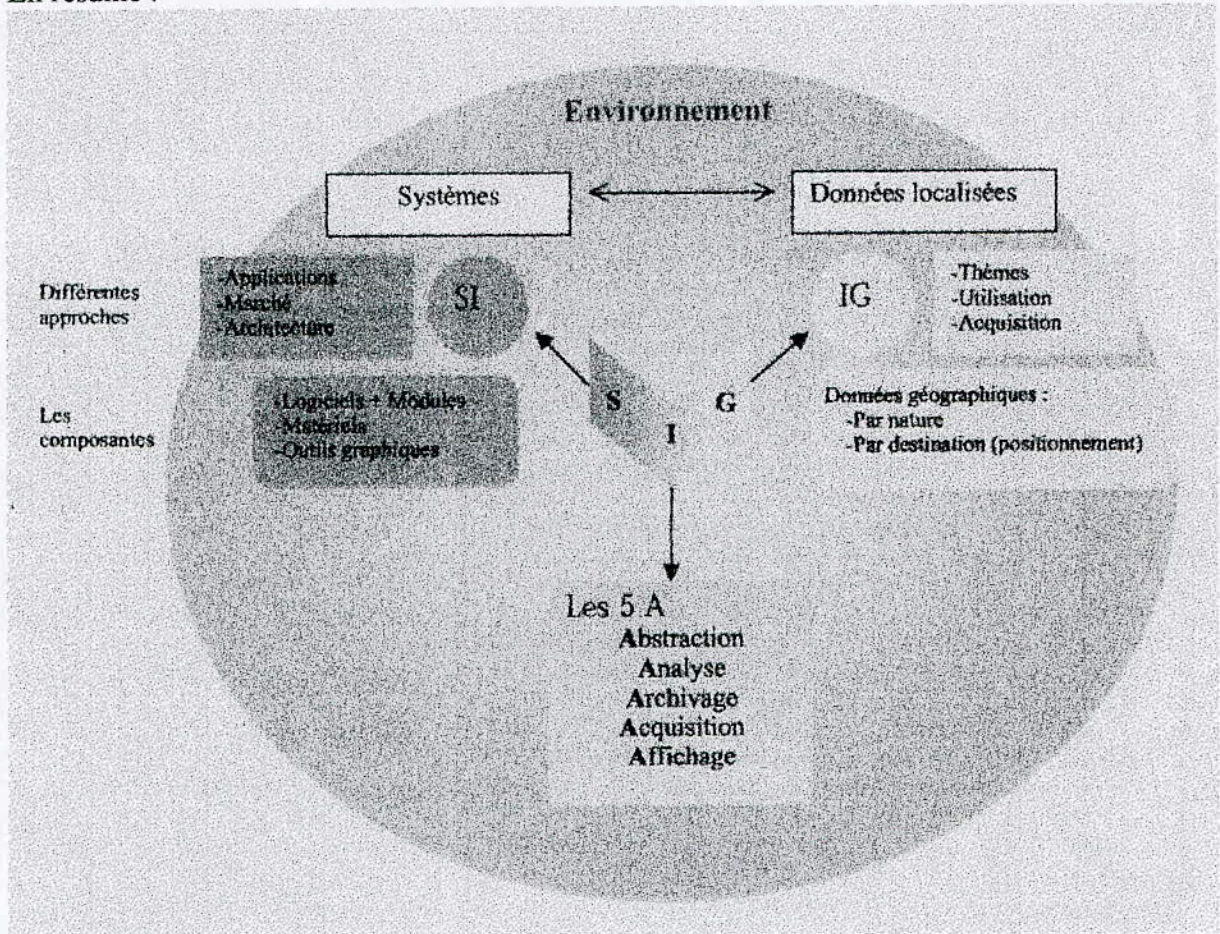
En plus de la base de donnée, un SIG contient aussi une base de connaissance :

- L'accès à toute information est nettement facile
- Evolution des modèles avec progrès des connaissances générales et mise à jour régulière et aisée des données
- Réalisation rapide des restitutions sur des thèmes finalisés « cartes thématiques »
- Possibilité de croisement des différentes données (télédétection, photographies aériennes, cartes thématiques)
- Possibilité de superposition des différents thèmes cartographiques (cartes topographiques, géologiques, géomorphologiques, cartes de végétations...).

2/ Inconvénient

- Complexité du système.
- Quelques difficultés de gestion de certaines données.
- La saisie est lourde surtout si l'on veut informatiser des données anciennes.

En résumé :



2.9. Conclusion

Les SIG sont donc un moyen très important de gestion et d'utilisation de la cartographie assistée par ordinateur, mais une bonne gestion de cet outil demande aussi une certaine maîtrise et une bonne connaissance de ce qui est en premier lieu la base de cette cartographie automatique qui est la « cartographie classique » qui reste l'outil initiale du Système d'Information Géographique

CHAPITRE 3
Eaux souterraines

3.1. Qu'est-ce que l'eau souterraine ? [7], [8].

On croit parfois que l'eau s'écoule par des cours d'eau souterrains ou qu'elle se rassemble dans des lacs souterrains. L'eau souterraine n'est pas seulement confinée à quelques canaux ou dépressions de la même façon que l'eau de surface se concentre dans des cours d'eau et des lacs. Au contraire, elle est presque omniprésente dans le sous-sol. On la trouve dans les interstices des particules de roches et de sol, ou dans les crevasses et fissures des roches.

L'eau qui remplit ces cavités se situe généralement dans les 100 mètres de la surface. C'est là que réside une grande partie de l'eau douce de la terre. À de plus grandes profondeurs, ces cavités sont beaucoup plus petites en raison du poids de la roche de recouvrement et, par conséquent, elles contiennent des quantités d'eau beaucoup moindres.

L'eau souterraine coule lentement à travers des formations aquifères (aquifères) à différents débits. À certains endroits, où elle a dissous le calcaire pour former des cavernes et de grandes ouvertures, son débit peut être relativement rapide, mais ceci est toutefois exceptionnel.

De nombreux termes sont utilisés pour décrire la nature et l'étendue des ressources en eau souterraine. Le niveau au-dessous duquel tous les interstices sont remplis d'eau s'appelle la *surface de saturation*. Au-dessus de cette surface se trouve la *zone d'aération*. Ici, les espaces dans la roche et le sol contiennent à la fois de l'air et de l'eau. L'eau dans cette zone s'appelle l'*humidité du sol*. Toute la région au-dessous de la surface de saturation est dénommée *zone de saturation*, et l'eau de cette zone est l'*eau souterraine*.

3.2. Différence entre les eaux souterraines et eaux de surfaces.

Contrairement aux eaux de surface, les eaux de nappes sont difficiles à capter, chaque ouvrage de prélèvement ne peut drainer qu'une fraction modeste de ressources.

Par ailleurs, la connaissance des ressources en eau de nappe est beaucoup plus difficile à acquérir que celle des eaux de surfaces. Il n'y a pas de méthode simple et infaillible pour connaître cette eau invisible. Là où une station de jaugeage suffit pour les eaux de surface, dont la ressource peut être caractérisé par la répartition statistique des débits, il faut essayer de connaître pour les eaux souterraines :

-La répartition statistique des alimentations qui dépend de l'état d'exploitation de la nappe (surtout pour les nappes captives) et ne sera jamais vraiment connue avant que la nappe ne soit surexploitée (on sous-estime toujours les apports par drains, ce dans un aquifère artificiellement déprimé) ;

-l'état de réserves profondes contenues dans la partie du réservoir qui n'est pas dénoyée lors des variations saisonnières habituelles des niveaux de l'eau ou alors des essais de débit (cette connaissance est encore du domaine de la recherche) ;

-les caractéristiques hydrodynamiques enfin du réservoir dont dépendent les facilités d'extraction.

3.3. Avantages liés à l'exploitation des eaux souterraines [9], [10]. [12]

S'il existe des interrelations évidentes entre les eaux de surface et les eaux souterraines qui méritent d'être prises en compte dans la gestion globale de la ressource, il convient de façon générale de privilégier le captage de l'eau dans le sous-sol plutôt que dans les cours d'eaux :

-l'eau souterraine est plus à l'abri de la pollution que ne le sont les eaux de surface ;

-l'exploitation des nappes souterraines permet de leurs faire jouer pleinement un rôle essentiel de stockage interannuel. L'utilisation des eaux souterraine est tout particulièrement recommandée pour la période de basses eaux des cours d'eau, comme s'est souvent le cas pour l'irrigation.

-la présence d'eau situer sur de très vastes surfaces, à une profondeur suffisamment faible, permet une exploitation décentralisée, évitant de lourds investissements d'adduction, aussi bien pour des utilisations domestiques qu'agricoles ou industrielles.

En raison des difficultés de connaissance de la ressource et parce que la probabilité de connaître un échec dans la réalisation d'un forage paraît suffisamment élevée dans beaucoup d'aquifères pour dissuader les opérateurs individuels

3.4. L'eau souterraine en mouvement perpétuel

Les matériaux *perméables* contiennent des fissures ou des espaces inter reliés qui sont suffisamment nombreux et grands pour laisser l'eau circuler librement. Dans certains matériaux perméables, l'eau souterraine peut se déplacer sur plusieurs mètres en une journée; en d'autres endroits, elle ne se déplace que de quelques centimètres en un siècle. L'eau souterraine ne circule que très lentement dans des matériaux relativement *impermeables* comme l'argile et les schistes.

Les spécialistes des eaux souterraines distinguent généralement deux types d'aquifères en fonction des attributs physiques de ces derniers : les milieux poreux et les aquifères fissurés.

Les *milieux poreux* sont des aquifères composés d'agrégats de particules distinctes comme le sable et le gravier. L'eau souterraine occupe les vides interstitiels des grains à travers lesquels elle circule. Les milieux poreux où les grains ne sont pas reliés l'un à l'autre sont considérés comme *meubles*. Si les grains sont cimentés les uns aux autres, ces aquifères sont dits *consolidés*. Les grès sont des exemples de milieux poreux consolidés.

Les *aquifères fissurés* sont des roches dans lesquelles l'eau souterraine circule à travers des fissures, des joints ou des fractures dans une roche par ailleurs solides. Le granite et le basalte en constituent des exemples. Les calcaires sont souvent des aquifères fissurés, mais, ici, les fissures et les fractures peuvent être agrandies par dissolution, formant de grands chenaux ou même des cavernes. Un terrain calcaire où la dissolution a été très active s'appelle le *karst*. Les milieux poreux comme le grès peuvent présenter un degré si élevé de cimentation ou de recristallisation que tous les espaces originaux sont remplis. Dans ce cas, la roche n'est plus un milieu poreux. Toutefois, si elle contient des fissures, elle peut encore assurer la fonction d'un aquifère fissuré.

La plupart des aquifères qui revêtent un intérêt pour nous sont des milieux poreux meubles comme le sable et le gravier. Certains matériaux très poreux ne sont pas perméables. L'argile, par exemple, comporte de nombreux interstices entre ses grains, mais ces vides interstitiels ne sont pas assez grands pour permettre le libre passage de l'eau.

L'eau souterraine coule généralement vers le bas, dans le sens de la pente de la surface de saturation. Comme l'eau de surface, l'eau souterraine s'écoule vers les cours d'eau, les lacs et les océans pour éventuellement les rejoindre. L'écoulement de l'eau souterraine dans les aquifères sous-jacents aux bassins versants de surface ne reflète pas toujours l'écoulement de l'eau à la surface. En conséquence, l'eau souterraine peut se déplacer dans des directions différentes de celles de l'écoulement de surface.

Les *aquifères libres* sont des nappes à surface libre limitées par la surface de saturation. Toutefois, certains aquifères se situent au-dessous de couches de matériaux imperméables; ce sont des *aquifères captifs*, ou parfois des *nappes artésiennes*. Un puits dans un aquifère de ce type est un *puits artésien*.

L'eau dans ces puits s'élève à un niveau plus haut que la partie supérieure de l'aquifère en raison de la pression sous laquelle elle est retenue. Si le niveau d'eau monte au-dessus de la surface du sol, il se forme un *puits jaillissant*. La *surface piézométrique* est le niveau auquel s'élèvera l'eau d'un aquifère artésien.

CHAPITRE 4
Présentation de la région
de TAMANRASSET

4.1. Présentation générale de la région de TAMANRASSET. [13] ; [14] ; [15]

La région d'étude centrée sur Tamanrasset, est située sur le versant sud-ouest de l'HAGGAR, elle est comprise entre les parallèles 22° et 23° Nord et les méridiens 5° et 6° Est. Elle recouvre une superficie d'environ 100 00 km².

D'après la classification de K.BLANKERMAN, la région est rapportée à la zone dite le **noyau**, dont le centre est le massif Atacorien aux sommets les plus hauts comme : TAHAT (2818 m), JLMAN (2760 m), ASSEKREM (2728).

La région de Tamanrasset a un relief de basse montagne. Donc les altitudes des lambeaux dominants basaltiques varient de 1940 m (Adaouda) à 1682 m (Adjelella).

Les altitudes absolues des lits des oueds varient de 1370m (oued Tamanrasset) à 1245m (secteur de talan teidit) jusqu'à 1120m (oued Tin- Amzi).

Ainsi la région en question est associée à la zone intermédiaire s'entendant du noyau centrale à une partie extrême pénéplainisée du socle cristallin.

4.2. GEOLOGIE

Le Hoggar appartient au bouclier Targui qui apparaît comme une vaste antecline débarrassée de la couverture sédimentaire qui la recouvrait antérieurement (figure 4.1).

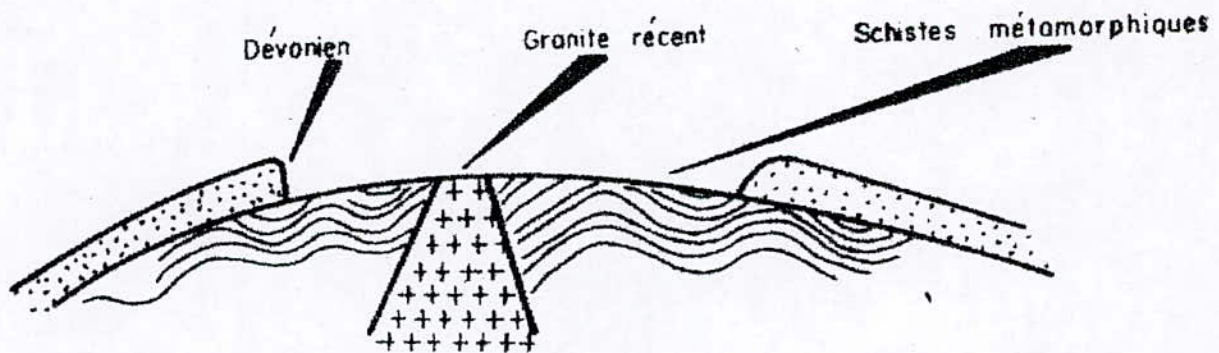


Figure 4.1. Coupe géologique schématique du bouclier Targui.

Le Hoggar couvre une superficie de 480 000 Kilomètres carrés et sa structure globale correspond à la juxtaposition de compartiments longitudinaux limités par de grandes failles subméridiennes.

4.2.1. Schéma structurel d'ensemble

Le schéma adopté actuellement se base sur la distinction en trois domaines (figure 4.2)

- Le Hoggar occidental.
- Le Hoggar central.
- Le Hoggar oriental.

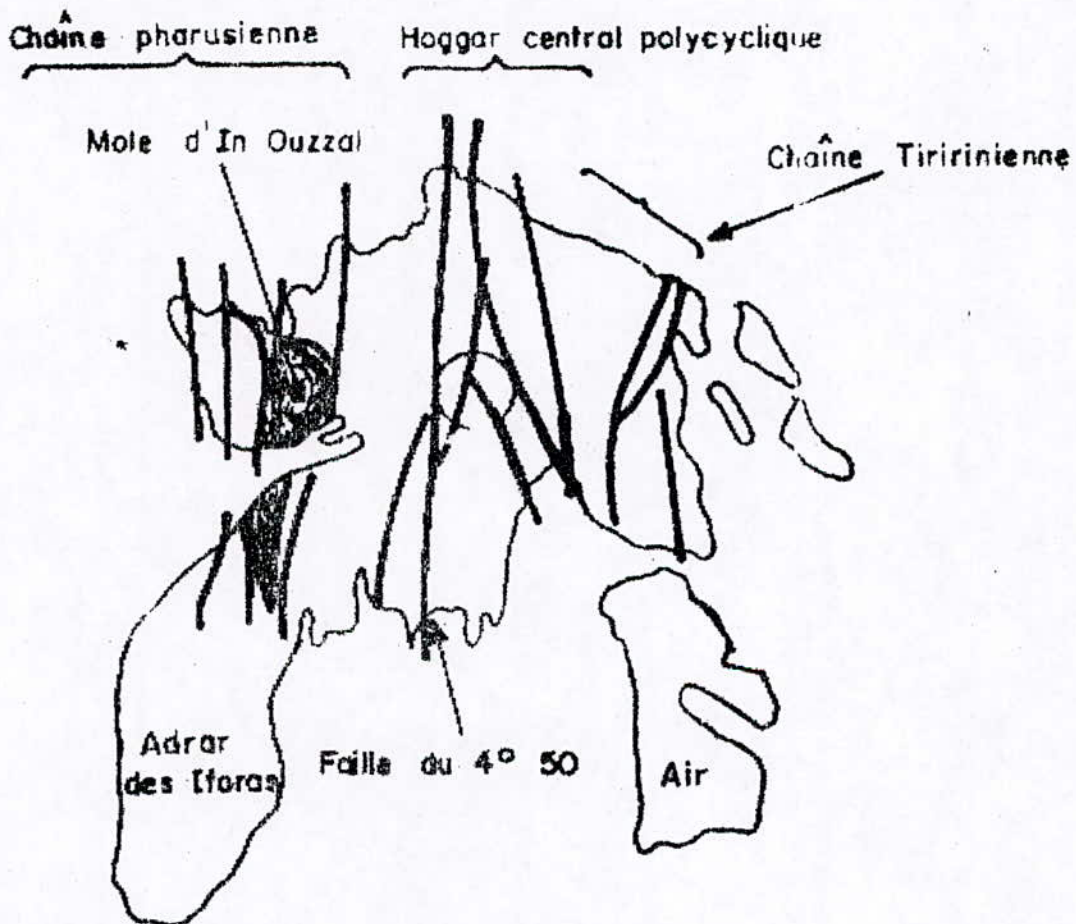


Figure 4.2 : Schéma structurel d'ensemble du massif

La région de Tamanrasset que nous étudions, se situe dans le Hoggar central polycyclique, ou Horst Suggarien.

4.2.1.1. Le Hoggar central polycyclique

La bande méridienne centrale qui nous intéresse est limitée par la faille du 5°80 à l'Est et la faille du 4°50 à l'Ouest (figure 2). C'est un domaine de roches précambriennes métamorphisées (suggarien), qui ont été recoupées par différentes générations de granite au pharusien, lors de l'orogénèse panafricaine, et recouvertes par endroits, à la fin du tertiaire et au Quaternaire, par des épandages volcaniques assez développés.

4.2.2. Les roches éruptives

La première génération de granite résulte d'une mobilisation locale des schistes cristallins (granite d'Outoul), ou d'une métasomatose potassique (granite d'Anfeg) qui aurait affecté la série de l'Arrechoum (FERAGNE, 1962).

Les massifs de la seconde génération sont, quant à eux, bien circonscrits et leur réparation seraient contrôlée par des failles. Le schéma évolutif de ces granites est partout le même cristallisation de granites sub-alcalin ou calco-alcalin, puis évolution vers des granites alcalins enrichis en fluorine.

4.2.3. Les roches volcaniques [17] ; [30] ; [31]

Les roches volcaniques forment par elles mêmes des reliefs. Les reliefs volcaniques sont construits avec des matières venant de l'intérieur du globe sous l'action de force internes dont le mécanisme nous est inconnu.

On peut observé cependant que les volcans , tant les volcans actifs que les volcans éteints , **jalonent les régions de dénivellations brusque de la lithosphère sont aussi les régions disloqués et semé de fractures, à la suite des grands mouvements tectoniques de la fin de l'ère secondaire et de l'ère tertiaire.**

Les volcans sont répartis en cinq zones, parmi ses zones celle qui nous intéresse est la zone des grandes fractures de l'Afrique centrale et orientale, de la mer Rouge et de l'Arabie.

Les matières ignées venant de l'intérieur n'arrivent jusqu'à la, surface que grâce à des fissures ; fissures qui doivent êtres particulièrement nombreuses dans les zones affectées par des dislocations, plis récent ou fracture.

Dans notre région d'étude les dépôts post-cambriens sont représentés par des formations volcanogènes qui appartiennent dans la région étudiée, à deux centres distincts : celui de l'Atakor et celui de la Tahalra.

Ce volcanisme est alcalin (basalte alcalin, mugéarite, trachyte et phonolite, caractéristiques des zones de distensions.

- **Dans l'Atakor**

La mise en place du matériel volcanique s'est déroulée en trois phases. Les épanchements de basaltes s'associent généralement à l'entrecroisement de zones faillées.

Dans plusieurs cas, les coulées de lave semblent avoir été canalisées par le réseau hydrographique, c'est le cas de la coulée de Tin Aidi qui se dirige vers In Amguel et celles de l'oued Ilamane à Tit et dans la région de Terhenent. **Ceci prouve que le réseau hydrographique était déjà formé lors de la dernière activité volcanique.**

- **Dans la Tahalra**

La Tahalra tassetef est un massif volcanique de 2000 km². L'épaisseur de la nappe de basalte est assez réduite, elle pourrait atteindre dans le meilleur des cas 150 m (d'autria, communication orale).

- **La latérisation**

Des horizons rougeâtres s'observent couramment dans l'Atakor et dans la Tahalra. Ces niveaux sont constitués par des latérites et soulignent généralement la base des coulées magmatiques, mais ils peuvent se développer aussi bien dans les roches cristallines (granites et gneiss) que dans des alluvions anciennes, dans ce cas, la stratification peut être conservée et on peut alors noter la présence de galets de granites.

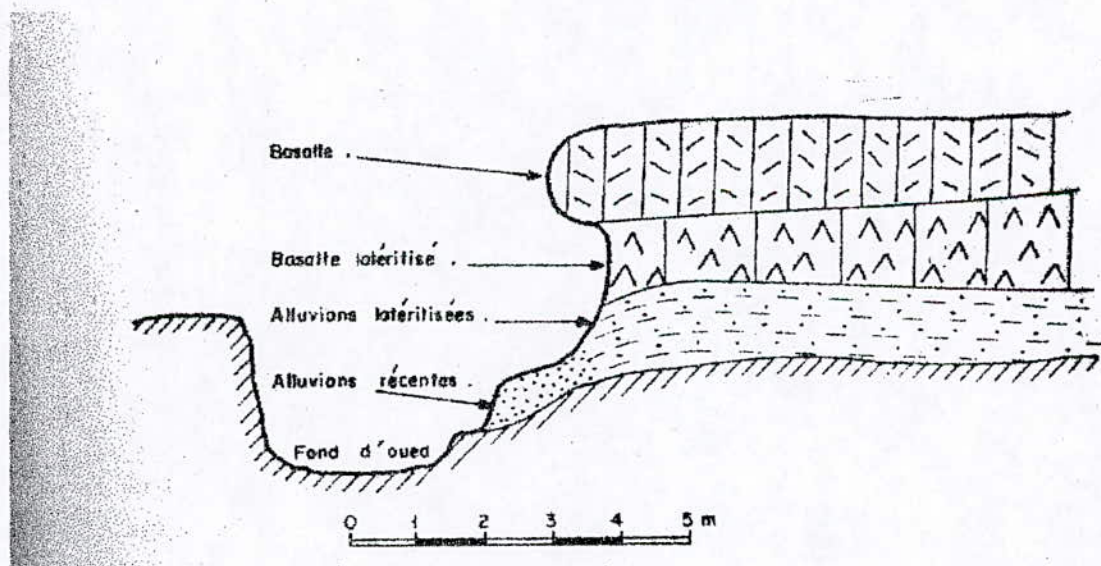


Figure 4.3 : Base de coulée basaltique latérisée, dans l'oued Relatouai (à 20 Km à l'Ouest de Tamanrasset)

4.3. Les accidents tectoniques majeurs

Les résultats des différentes phases tectoniques a abouti dans la Hoggar central à une structure complexe caractérisée par de nombreux accidents développés le plus souvent dans les roches du socle.

Deux types d'accidents se dégagent nettement en photographies aériennes.

4.3.1. Les accidents méridiens

Ce sont les plus anciens bien qu'ils aient rejoué à maintes reprises au cours des temps géologiques.

Ces accidents sont soulignés sur le terrain, tantôt par des zones de broyage (mylonites de la faille du 4°50 à Abalessa), tantôt par des niveaux silicifiés et durcis dessinant dans le paysage une suite de crêtes caractéristiques, constituant parfois un gigantesque cloisonnement.

Ces fractures ont joué en décrochement et déplacements latéraux atteignent parfois 100km. Ces accidents, le plus souvent recimentés, se comportent comme des barrières imperméables vis-à-vis des eaux souterraines.

Une des branches de la faille du 4°50 remonte depuis le nœud d'Amselka, borde à l'Est la Tahalra, traverse Tamenrasset et disparaît sous le manteau volcanique de l'Atakor.

4.3.2. Les accidents 70 Est

Ils sont plus récents et sont en relation avec une néotectonique post-crétacée. Ces fractures regroupent les précédents (les méridiens) et les décalent fréquemment.

Non silifiés, donc tendres, ils se présentent le plus souvent en creux dans la nature et de nombreux oueds les empruntent (gouttières d'In Tounine, d'Amsel, d'in Amguel, ect...), notamment pour traverser les barrières mylonitisées : oued Abalessa par exemple.

Ces accidents ont un intérêt hydrogéologique fondamental du fait des « ouvertures » qu'ils ont créés dans le socle cristallin.

4.4. MORPHOLOGIE DU MASSIF [16], [17], [19]

4.4.1. Mise en place du massif

A la fin du Mésozoïque, le Hoggar devient « un point chaud », c'est à dire une zone de concentration du flux thermique et des éléments radioactifs et, des mouvements épirogéniques s'amorcent. Le soulèvement du Hoggar devient sensible au Miocène et va se poursuivre durant tout le Quaternaire.

Ce mouvement de surrection est accompagné d'un volcanisme type alcalin, caractéristique des zones de distension à l'origine des rifts qui succèdent habituellement aux phénomènes de bombement.

Le soulèvement dépasse 1 000 m dans l'Atakor. Le socle est déformé et une érosion intense va aboutir à la mise à nu des formations hypovolcaniques (necks et sills).

4.4.2. Les différentes zones morphologiques

D'un point de vue morphologique, le soulèvement du Hoggar va aboutir à une disposition en trois zones concentriques :

- Un noyau central comprenant l'Atakor, d'altitude moyenne 2 000 m (figure 4.4).
- Une auréole de basses plaines.
- Une ceinture périphériques de reliefs, situé à 300 km de l'Atakor et constitué par des terrains paléozoïques des Tassilis.

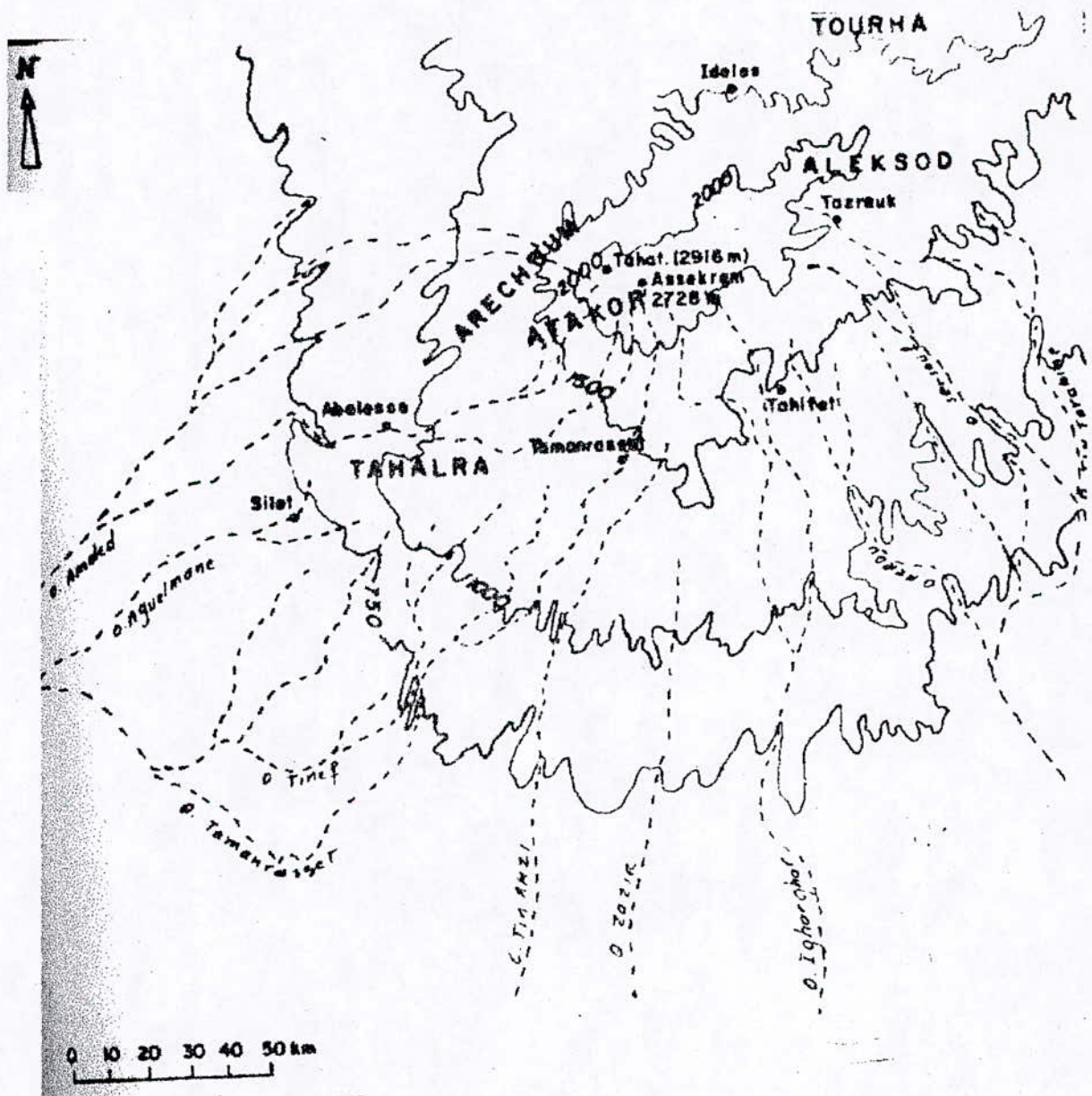


Figure 4.4 : Esquisse morphologique (Hoggar central)

4.5. LES TERRAINS SUSCEPTIBLES D'ETRE AQUIFERES

Il y a au Hoggar quatre possibilité de formation et accumulation des eaux souterraines :

1. Les dépôts d'alluvions et de colluvions dans les oueds, ainsi que la zone d'altération du socle cristallin sous-jacente, c'est l'aquifère le plus important.
2. L'aquifère lié aux fissures du socle cristallin.
3. les formations volcaniques.
4. les terrains sédimentaires des zones marginales (auréole Tassilienne et Tanezrouft).

Dans la région de Tamanrasset que nous étudions, seuls les terrains sédimentaires ne sont pas représentés.

4.6. LE MILIEU FISSURE

4.6.1. Généralités

Les plus grands centres de culture correspondent aux zones les plus riches en eau : Abalessa, Silet, In Eker, In Amguel, Tit, Outoul, Amsel, Tamanrasset, Taghaouhaout, Tahifet, Tazrout, Ideles.

4.6.2. Etat des connaissances

Pour les hydrogéologues, le caractère favorable des régions d'extension des massifs basaltiques ne fait pas de doute. Ils fondent leur hypothèse sur le fait que bon nombre de puits et foggaras (Ifelan) se trouvent dans les parties marginales des massifs volcaniques ; c'est le cas à Silet, Tazrout, Ideles et Hirafok.

D'autres auteurs enfin, pensent que les accidents tectoniques qui affectent le socle, ont un intérêt hydraulique fondamental.

4.6.3. Situation morphologique d'Amsel

Amsel est un centre de culture aux possibilités aquifères relativement importantes. Il se situe au bout d'une gouttière topographique rectiligne de 16 km de long. La terminaison avale de ce sillon est tronquée par une barrière rocheuse, sécante. La rencontre de ces deux types de structures crée un verrou topographique : il y a étranglement de la vallée, relèvement du bed-rock et création d'un seuil naturel favorable à l'accumulation des eaux. Le niveau piézométrique est alors sub-affleurant, c'est ce que les touaregs désignent sous le nom d'abankor.

L'environnement géologique est formé par un couloir, le gneiss pincé entre deux domaines granitiques:

- Le granite d'Anfeg, 10 km à l'Est.
- Le granite d'Outoul, 6 Km plus à l'Ouest, recouvert dans sa partie médiane par les basaltes de la Tahalra.

La gouttière dans laquelle s'est installée l'oued Ezerze-Amsel souligne une ligne de faiblesse tectonique de direction ENE-WSW.

La barrière rocheuse formant écran est sommairement sub-méridienne et est formée de micro granites et leptinites particulièrement résistants.

4.6.4. Les autres centres du Hoggar

Le schéma structurel décrit ci-dessous, se rencontre fréquemment dans le Hoggar central, mais seuls les sillons de grande ampleur (au delà de 10 km de longueur) offrent des possibilités en eau intéressantes.

La gouttière atteint 32 km de longueur rectiligne à In Amguel

40 Km à In Eker

60 Km à Abalessa.

Mais l'accident le plus spectaculaire est celui de l'oued Amded, plus de 100 Km de long.

L'orientation générale de ces gouttières est N 40 ou N 140 et reflète les traces de fractures ouvertes de la phase tectonique Post-Crétacé.

Les barrières rocheuses qui créent les seuils, sont liées aux accidents tectoniques sub-méridiens de la phase éburnéenne. Ils sont tantôt mylonitisés, tantôt silicifiés et se comportent en « écrans » vis-à-vis des eaux souterraines.

Ces barrières sont parfois imposantes constituant de véritables montagnes (Adrar Ibareghlanin à Abalessa), mais le plus souvent il s'agit de crêtes peu élevées constituées de dykes de roches de nature diverses particulièrement résistantes.

La considération d'un profil topographique le long des oueds montre des ruptures de pentes fréquentes à cause des seuils.

4.7. Constitution des écrans rocheux formant seuils

La charpente de la ligne de crête est constituée généralement par un filon de quartz de quelques décimètres d'épaisseur, et plus souvent par un banc de plusieurs mètres de largeur, représenté par des amphibolites, dolérites, leptinites et micro granites injectés de quartz et de veines de pegmatites (figure 4.5)

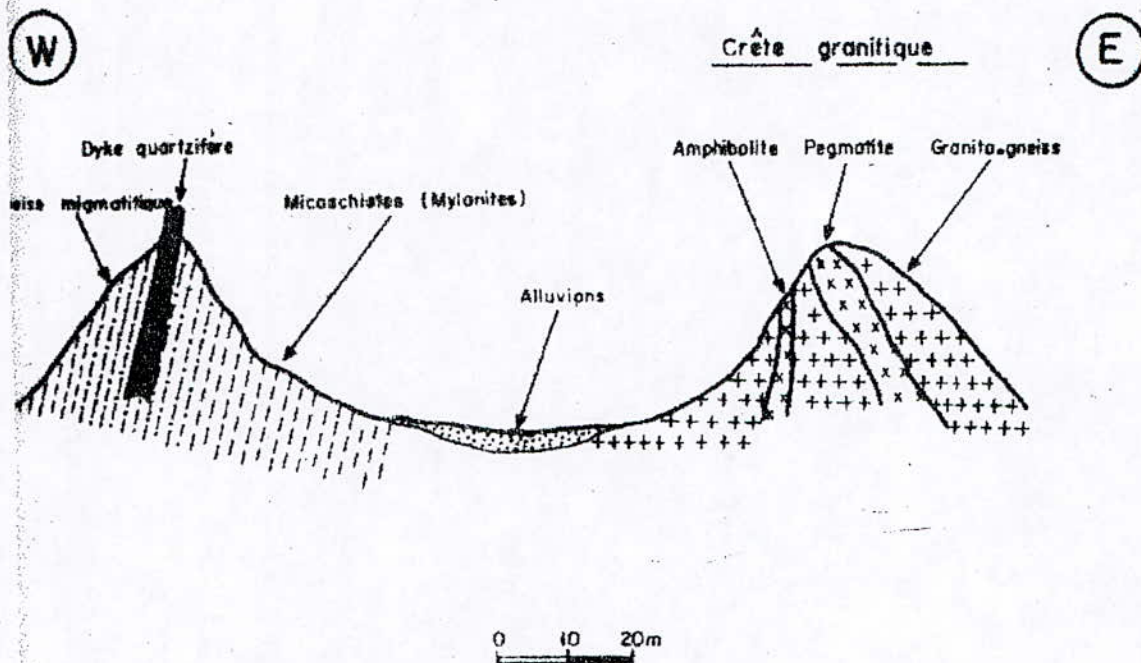


Figure 4.5. : Coupe transversale E.W dans un « couloir clair » à In DALAG

De part et d'autre de l'axe de la crête, la roche devient de plus en plus tendre et feuilletée. A la faveur du ravinement, un couloir se constitue dans l'intervalle de lignes de crêtes parallèles. Les faisceaux de dykes sont alors jalonnés de lanières claires qui rappellent les gouttières d'origine tectonique.

Ces couloirs clairs sont eux-aussi parcourus par le réseau hydrographique, mais leur rôle hydrodynamique n'est pas aussi intéressant que celui des gouttières tectoniques.

A 9 km au nord de Tamanrasset, sur le flanc Ouest du batholite granitique de l'Adrar Hagarane, jaillit une source (Tahabort ou source Chapuis) riche en CO_2 .

L'observation des photographies aériennes permet de constater que cette source se localise à l'extrémité Nord-Ouest du massif granitique intrusif d'In Tounine, la où ce massif se trouve tronqué par une large crête filonienne (quartz) sub-méridienne, constituant la charpente du batholite (figure 4.6)

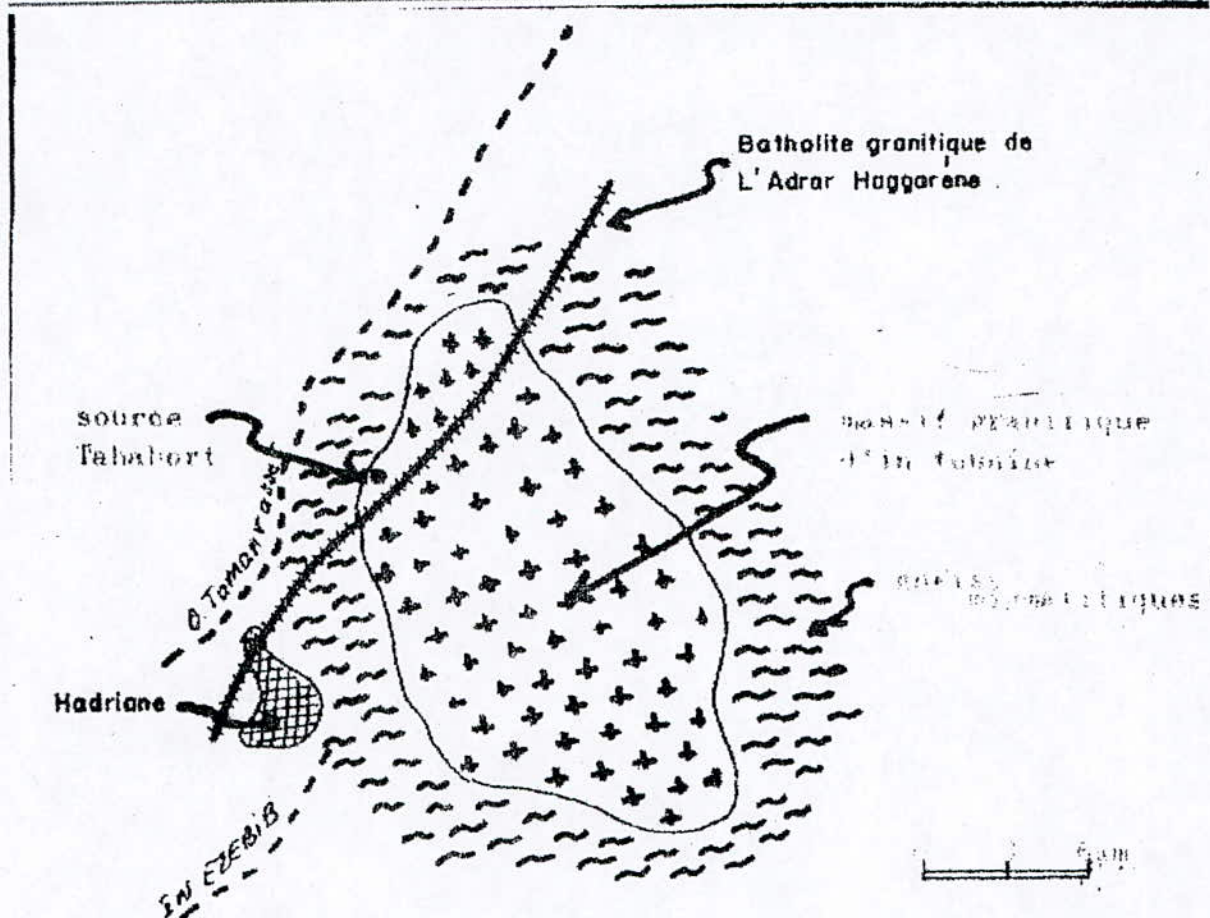


Figure 4.6. : Situation de la source Tahahart (S.Chapuis)

Le débit de cette source est très faible (inférieur à 1/s) et les caractéristiques géochimiques de son eau assez particulières.

4.8. ETUDE DES DISLOCATION [36]

4.8.1. A l'échelle de l'affleurement

Les fissures observées à l'échelle de l'affleurement en milieu karstique rendent compte de structures plus importantes.

La technique consiste à relever les discontinuités recoupées par une ligne de 10 m de long. On note alors l'orientation, l'ouverture, la distance inter-fissurale et le pendage des fissures.

On doit aussi distinguer la fissuration originelle, liée aux forces de retrait dans les roches cristallines et les laves, de la fissuration héritée due aux déformations tectoniques.

L'ouverture des fissures observées est généralement d'ordre centimétrique, parfois millimétrique, rarement décimétrique. Ces ouvertures vont conditionner la perméabilité de la matrice rocheuse. Le pendage est généralement sub-vertical.

Le traitement suivant de l'orientation sur diagramme de WOLF (figure 4.7), montre que les plus grandes fréquences sont N 140 et n 40 ; et accessoirement N-S à Imlalaouène.

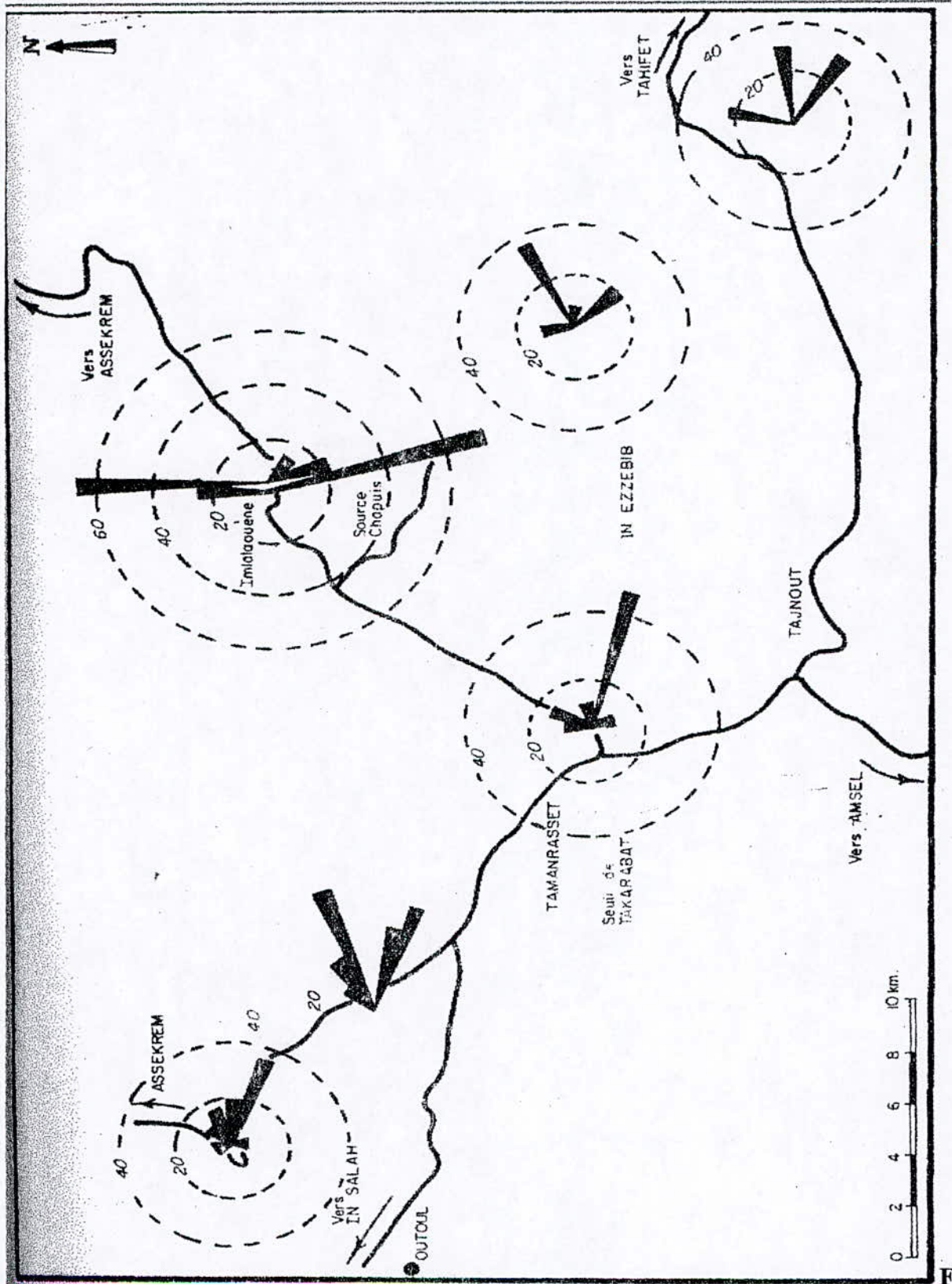


Figure 4.7 : Stations de mesures de fissuration en surface

4.8.2. La carte des fractures

La figure 4.8, représente les lignes de fractures les plus remarquables de la région étudiée. On peut relever :

- La dépression de Tit parcourue par un réseau de petites failles d'effondrements regroupés le long d'un accident plus important, qui se dirige vers Abalessa.
- Les zones de convergence de petites fractures, telles celles d'Essali Sekine et Tin Amensagh.
- La cuvette de Tamanrasset avec ses bandes de broyage jalonnées de couloirs drainés par les affluents de la rive droite de l'oued Tamanrasset.
- La zone centrale de la feuille qui est un domaine des « sillons 70 E » ; les plus importants sont les « sillons collecteurs canalisateurs » d'In Ezerze, d'In Tounine-Tifougueguine et la gouttière de l'oued Tin Amzi jusqu'au verrou topographique de Tilamas Illado.
- Dans le secteur Est notons la prédominance des fractures N 140 parmi lesquelles citons la gouttière alluviale de Taghouhaout et l'accident de l'oued Igharghar.



Figure 4.8 : Carte des fractures

4.9. Les possibilités d'infiltration par les fissures

4.9.1. Sur les basaltes

Les accidents tectoniques majeurs aux manifestations volcaniques de la fin du tertiaire et du quaternaire. Ils n'affectent donc pas le manteau basaltique.

A l'échelle des affleurements cependant, les parois verticales des coulées de basalte, montrent des débits prismatiques verticaux, favorables à l'infiltration directe.

La profondeur des fissures ouvertes atteindrait facilement 200 m (dénivelée entre le sommet de l'Hadriene et son piémont). Les roches volcaniques des plateaux de l'Atakor sont elles aussi diaclasées, sur toute leur épaisseur et sont pour cette raison perméables.

Dans la Tahalra par contre, qui est constituée par une multitude de cratères et de cônes égueulés, les débits orientés et les « orgues basaltiques » sont beaucoup moins développés, ce qui laisse supposer une perméabilité moindre des basaltes de cette région.

4.9.2. Sur les granites

Les régions granitiques comportent des fractures tectoniques et des fissures de retraits. Les unes et les autres sont largement ouvertes en surface et sont couramment observées sur les coupes granitiques et les surfaces structurales. Elles aboutissent à une altération caractéristique en boules.

Pourtant les pourtours des dômes granitiques sont fortement ravinés ; ceci témoigne de l'intensité du ruissellement au moment des orages autour de ces massifs. Les fissures se colmatent et se referment lorsque la profondeur augmente, les eaux sont alors drainées latéralement et restituées sur les flancs des massifs.

La fissure des granites semble être un phénomène de surface c'est à dire limité à une croûte superficielle. La profondeur des fissures ouvertes ne pourrait excéder la centaine de mètres (Dénivelée moyenne entre le haut du massif d'In Tounine et la côte de résurgence du ruisseau du même nom).

La plupart des ruisseaux que nous connaissons, naissent aux pourtours des massifs granitiques : ruisseaux d'In Tounine et d'in Ezebib, petite cascade de Tamekrest, ruisseau de Tequit sur la route de l'assekrem par l'Ilamane, etc...

Remarque

Dans l'Atakor, au cœur des affleurements basaltiques, les gueltas (Aguelman en Tamhaq) sont installées sur fond de granite. C'est le cas d'Afilal, d'Eguegmelen et d'Issekerassene. **En conséquence, les basaltes sont plus perméables que les granites lorsque la croûte superficielle de ceux-ci est décapée.**

4.9.3. Les gneiss

A l'échelle de l'affleurement, l'ouverture des fissures est de l'ordre millimétrique. La roche est fortement schistosée mais la nature argileuse des minéraux la rend peu favorable à l'infiltration.

CHAPITRE 5
Etude des bassins versants

5.1. Définitions [17], [30], [31]

Le bassin d'un cours d'eau en une section normale considérée, est la surface topographique drainée par le cours d'eau et ses affluents, de telle sorte que les précipitations et les écoulements passent par le point considéré, avant de poursuivre leur trajet.

La région étudiée est approximativement circonscrite par « l'isohyète 10 » de la carte pluviométrique de DUBIEF. Nous allons donc nous limiter à la courbe de niveau 700 m, c'est ainsi que nous allons fermer le bassin versant de Tamanrasset à Amselka et celui d'Abalessa à Iglene, c'est à dire bien avant que les oueds n'aient achevé leur développement.

5.2. Les différentes composantes d'un bassin

Du fait du régime et des conditions climatiques, le réseau hydrographique au Hoggar a une activité épisodique. Il fonctionne par intermittence dans ses parties supérieures, au moment des pluies.

Il devient nécessaire alors de distinguer différentes composantes dans un bassin versant : le bassin total, le bassin actif et l'élément générateur d'écoulement.

5.2.1. Le bassin total

Il commence à la source de l'oued principal et finit quand le lit de cet oued ne peut plus être discerné. Pour l'oued Tamanrasset, le bassin entier commence en assekrem et finit dans le Tanezrouft. Le réseau y devient diffus et disparate avant de se perdre dans de vastes cuvettes (aciak).

5.2.2. Le bassin actif

C'est la partie du bassin qui reçoit périodiquement des écoulements ou tout au moins, le secteur où on a déjà observé des crues. On peut de ce fait imaginer à ce niveau une recharge des aquifères alluviaux.

5.2.3. L'élément générateur d'écoulement

Il correspond aux zones élevées du bassin versant, là où les précipitations sont suffisantes pour donner un ruissellement superficiel.

DUBIEF estime qu'il faut 5 mm/heure, sur des terrains en pente et non sablonneux pour qu'il y ait ruissellement.

5.3. Les bassins de la région de Tamanrasset

La feuille de Tamanrasset au 1/200000 est couverte par six unités hydrologiques (figure 5.1) :

- l'unité A de l'oued Abalessa

- l'unité B de l'oued Tamanrasset
- l'unité f de l'oued Tinef

C'est dernière forment le bassin de l'oued Tamanrasset

- l'unité C de l'oued Tin Amzi
- l'unité D de l'oued Tgharghar Sud
- l'unité E de l'oued Anfeg

Elles appartiennent au grand bassin du Niger.

Trois des six unités définies ci-dessus, débutent dans les parties sommitales de l'Atakor, là où précisément les pluies sont maximales.

Par ailleurs, grâce au reliefs constitués par les basaltes de la Tahalra et par l'inselberg granitique de l'Adrar Heguerane, les trois autres bassins peuvent être considérés à des degrés moindres comme « générateurs d'écoulement ».

5.4. Dynamique des bassins [19], [22], [30]

Le document élaboré (figure 5.1) permet de voir que les bassins versants sont d'une façon générale assez allongée.

Les bassins étirés échelonnent la concentration des débits des talwegs lors des crues ; l'inondation des terrasses alluviales sera alors plus longue et la recharge de l'inféoflux par infiltration, en sera plus substantielle.

Cet aspect du problème est habituellement mis en évidence par l'hydrogramme de la crue, c'est à dire la courbe qui représente les débits d'écoulement à une section déterminée, en fonction du temps.

Toutes choses égales et en supposant une lithologie semblable, le bassin de Tamanrasset donnerait un hydrogramme plus étalé (figure 5.2 A) que le bassin d'Abalessa (figure 5.2 B)

Une meilleure analyse de cette question est possible grâce au calcul de l'indice de forme du bassin ou indice de compacité de GRAVELIUS.

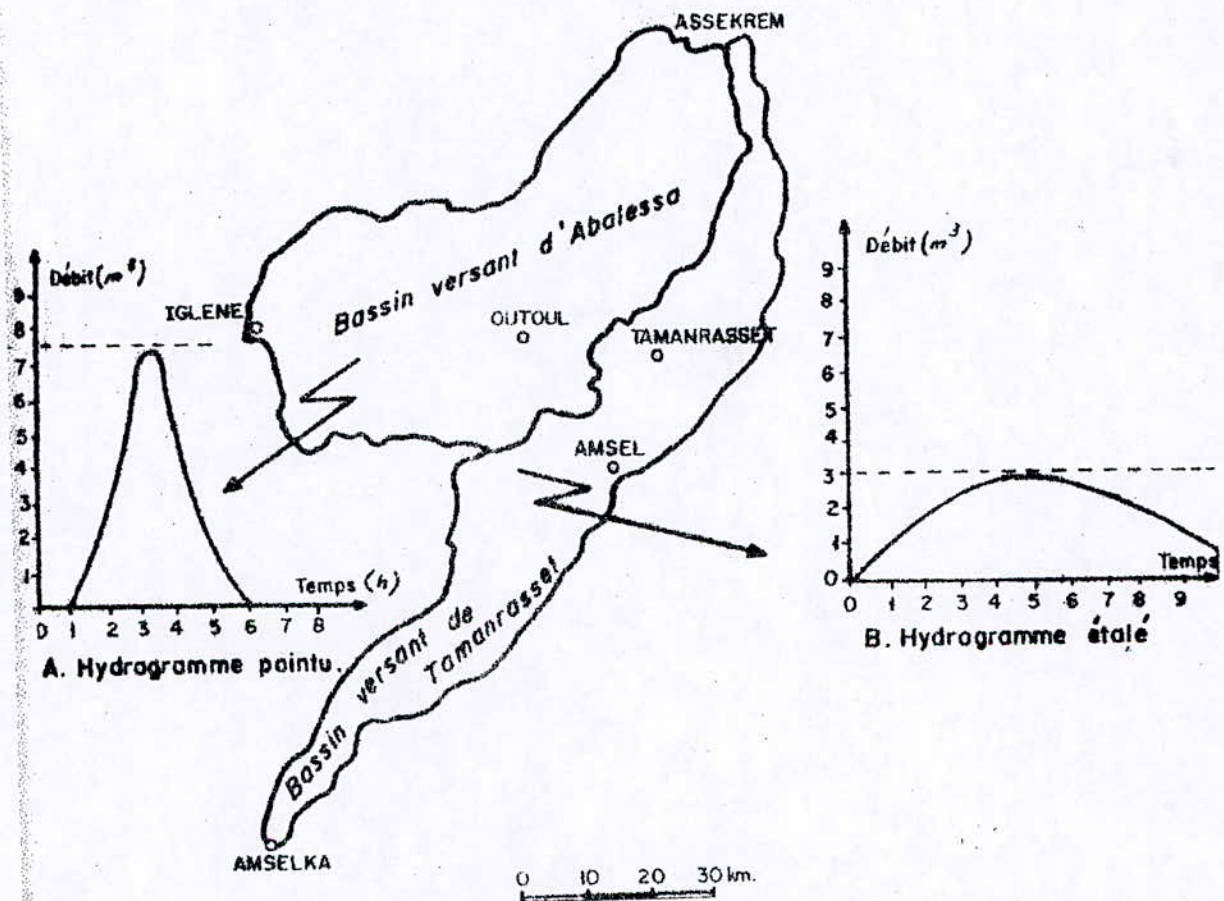


Figure 5.2 : Dynamique des bassins types d'hydrogrammes de crues.

5.5. Indice de forme

$$K = \frac{P}{2\sqrt{\pi A}}$$

Cet indice exprime le rapport du périmètre (p) d'un bassin quelconque à celui d'un cercle ayant la même superficie (A).

Le calcul de K nécessite donc la connaissance du périmètre de chaque unité hydrologique considérée, et sa superficie. C'est ce que nous avons fait pour 79 sous-bassins de la zone étudiée.

La valeur de K rend compte de la plus ou moins grande vitesse de concentration à l'exutoire, des eaux de ruissellement en provenance des diverses parties du bassin.

Quand K est voisin de 1 (unité, cela signifie que le bassin considéré est de forme ramassée et que le ruissellement se concentre rapidement.

Quand K augmente, il traduit l'étirement du bassin.

5.6. Les résultats

La confrontation de la figure 4.8 avec la *carte géologique extrait de la carte géologique du HOFFGAR* (voir Annexe) permet de constater que les bassins ramassés correspondent à des domaines granitiques. Ils donnent les valeurs les plus basses $1 < K < 1.5$. C'est le cas des sous-bassins d'Amekeni, d'Ihelfène, d'In Tounine, ect... (Tableau 5.1).

Les valeurs les plus élevées de K, correspondent aux zones de gneiss. La migmatisation de ces roches est responsable de lignes de crêtes parallèles que suivant fréquemment les lignes de partage des eaux. $K=2, 3$ dans le bassin de l'oued Ilamane, $K=2$ pour le bassin de Tamanrasset, 1.7 pour Tin Amzi, etc...

Les basaltes (dans la Tahalra) donnent des valeurs intermédiaires $K=1.2$ pour le B 8 et 1.58 pour l'oued Amsa dans le plateau de l'Issakram.

En conséquence, les bassins versants développés sur les gneiss, sont très étirés et sont de ce point de vue, les plus intéressants pour la recharge des inféroflux, car ils échelonnent et ralentissent le passage des eaux de crues sur les terrasses alluviales.

Bassin versant	Superficie (kilomètre carré)	Périmètre	Indice compacité Gravelius K	de de	Longueur rectangle équivalent	du
O. Ilamane (G)	138	95	2,28		141	
A3 Terhenent	58	52	1,92			
O. Amsa (β)	270	92	1,57			
Inelfene (γ ancien)	179	52	1,09		116	
Tamanrasset amont ($\beta + G$)	320	104	1,65			
Amsel ($G + \gamma$)	204	75	1,48		39	
B2 Tissiaouine(γ ancien)	114	40	1,05			
B8 (basalte)	164	55	1,20			
Tamanrasset total à Amselka	2013	325	2		117	
In Dalag	268	90	1,55			
Fort Moty ($\gamma + G$)	249	90	1,22		48	
O. Tahafet ($G + \gamma$)	872	165	1,57			
Igharghar Sud	3900	340	1,53		180	
In Tounine (γ récent)	49	39	1,57			
Tin Amzi total	1558	240,8	1,7		132	

Tableau 5.1 : Valeurs de l'indice de GRAVILIUS sur quelques bassins.

G = gneiss ; β = basalte ; γ = granite.

5.7. Rôle de la LITHOLOGIE [23], [28], [31]

5.7.1. Facteurs favorables à l'infiltration

La forme du bassin versant n'intervient pas seulement dans l'allure de l'hydrogramme. Habituellement, la végétation et la nature lithologique ont un rôle essentiel dans l'amortissement des crues. Or, l'action du tapis végétal est nulle au Hoggar ; le sol étant dénudé. Alors, seul le second paramètre va déterminer la tendance potentielle au ruissellement.

Les roches composant une lithologie ancienne sont souvent imperméables quand elles sont sans végétation, ni recouvrement récent ; mais quand cette lithologie est fracturée, comme c'est le cas au Hoggar, les granites ou les gneiss vont acquérir à l'échelle régionale une capacité de rétention intéressante, liée à l'altération et à de multiples micro-fissures de la roche. Nous avons émis des hypothèses quant aux possibilités d'infiltration par les fissures.

5.7.2. Densité de drainage

La tendance potentielle au ruissellement est reflétée par la densité du réseau hydrographique, c'est à dire la longueur cumulée (L_x) des talwegs par unité de surface (A).

Plus la densité de drainage est élevée plus le sol est imperméable.

Calculons alors la densité de drainage D_d et comparons entre eux, divers faciès géologiques, sous l'angle de la perméabilité. Sachant que :

$$D_d = \frac{\sum L_x}{A}$$

Dans les plaines granitiques de Tit et d'Outoul, on obtient les valeurs les plus basses $D_d=1.2$. la désagrégation et l'arénisation des granites, constitue en surface une couche détritique semi-perméable qui rend possible la percolation en profondeur.

Les granites récents d'In Tounine et d'Ahelaheg donnent des valeurs légèrement plus élevées, $D_d=1.5$.

Dans la Tahalra, les basaltes donnent $D_d=1.64$.

Enfin, les gneiss, bien que fortement schistosés et morcelés constituent apparemment la faciès le moins perméable. On obtient par endroit des valeurs supérieures à 2 (Tableau 5.2).

D'une façon globale, le bassin versant total de l'oued Tamanrasset, essentiellement développé sur des gneiss, a une densité de drainage de 1.69 ; et la bassin de l'oued Abalessa qui draine les massifs granitiques de Tit et d'Outoul donne un chiffre de 1.42.

On conclue que dans le 1/200 000° de Tamanrasset les granites constituent le faciès le plus intéressant pour l'infiltration directe.

Zone étudiée	Superficie (A) en Kilomètre carré	Long. Cumulée lx en Kilomètre	Dd
Granite de Tit	760	944	1.242
Granite d'Outoul	412	508	1.233
Granite d'In tounine	160	228	1.425
Granite d'Ahelaheg	96	158	1.645
Basalte (Tahalra)	156	256	1.64
Tahalra (Est)	668	1 134	1.69
Bassin versant d'Amsel	204	322	1.578
Bassin versant inf. de Tamanrasset : d'In Tatane à Amselka	660	1 488	2.25
Bassin versant inf. de Tamanrasset	2013	3 403	1.69
Bassin versant d'Abalessa	2800	3 976	1.41

Tableau 5.2 : Densité de drainage en fonction des faciès géologiques.

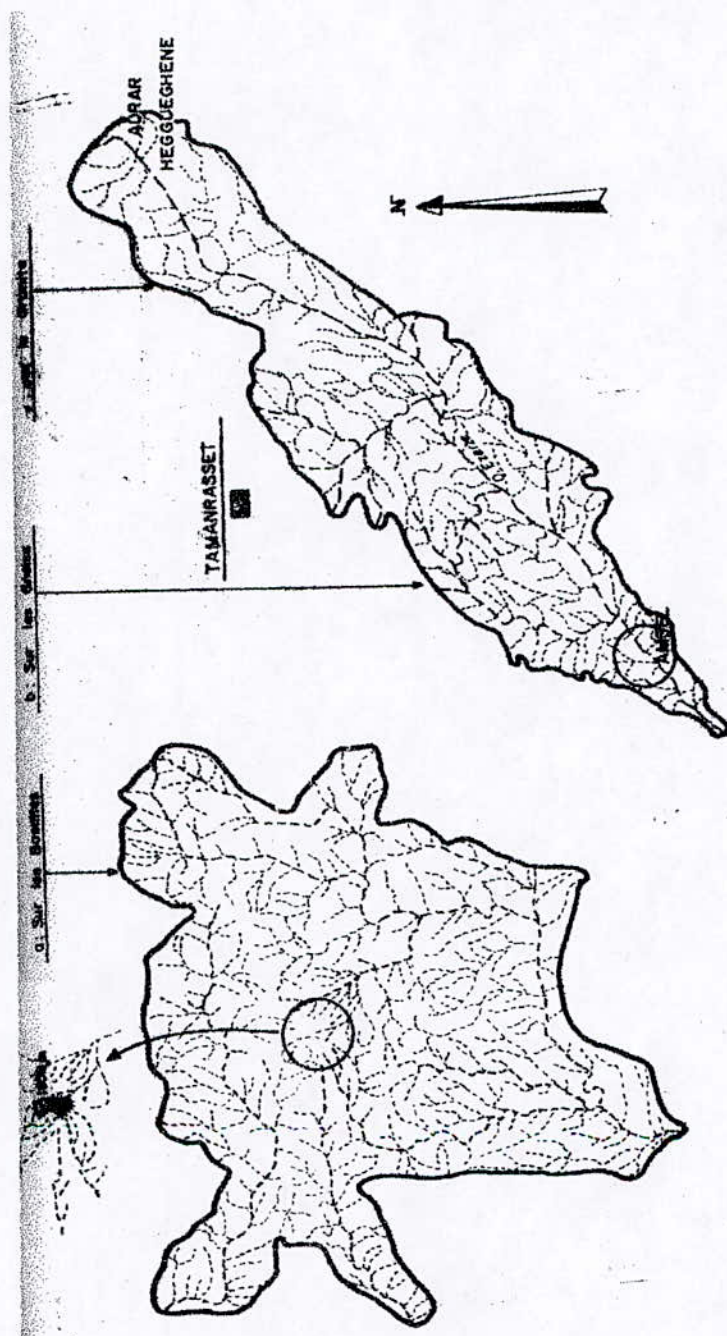


Figure 5.3 : Allure et densité du réseau hydraulique

CHAPITRE 6
Hydrogéologie

6.1. Rappels d'hydrogéologie [11], [12]

L'hydrogéologie est la science de l'eau souterraine, elle a pour objectif l'étude du rôle des matériaux constituant le sous-sol et des structures hydrogéologiques avec application des lois physiques, dans l'origine, la distribution, les caractéristiques de gisement et les modalités de l'écoulement. Elle applique les connaissances acquises sur la prospection, le captage, l'exploitation et la gestion de l'eau souterraine.

Dans le but de comprendre l'origine de l'eau souterraine et les modalités de son écoulement dans le sous sol. Il est utile de la situer dans le cadre de la répartition et de la circulation de l'eau sur la terre.

Pour avoir un aperçu de la répartition des eaux sur le globe ; d'après les travaux Soviétiques (UNESCO 1978) on a :

Grands réservoirs	Valeur d'eaux stockées			
	Totaux		Eau douce	
	Km ³	%	Km ³	%
Océan	1340000000	96.4		
Glaces Calottes glacières Glaciers et neige éternelles	24000000	1.72	24000000	60
Eaux souterraines aquifères:				
Franche 0-200m	10000000			
" 0-2000m	24000000	1.72	16000000	40
" 0-5000m	60000000			
Humidité du sol	165000	0.001	16500	0.04
Eaux de surfaces des continents :				
Lacs, grands réservoirs	176400	0.013	90000	0.22
Lits des cours d'eaux	2120	0.00015	2120	0.005
Atmosphère	13000	0.001	13000	0.03
Eau biologique	1120	0.0001	1120	0.003
Globe hydrosphère	1390000000		40000000*	

Tableau 6.1 : capacité des grands réservoirs d'eau à la surface de la terre.

* Soit 2.9 % de l'eau du globe.

Grands continents	Surface 10^6 Km^2	Stocks d'eau 10^6 Km^3			
		0 à 100m	100 à 200m	200 à 2000m	totaux
Europe	10.5	0.2	0.3	1.1	1.6
Asie	43.5	1.3	2.1	4.4	7.8
Afrique	30.1	1	1.5	3	5.5
Amérique du nord	24.2	0.7	1.2	2.4	4.3
Amérique du sud	17.8	0.3	0.9	1.8	3
Australie	8.9	0.1	0.2	0.9	1.2
totaux	135	3.6	6.2	13.6	23.4

Tableau 6.2: volume d'eau stocké dans les réservoirs souterrain des grands continents

	Ecoulement total naturel moyen Km^3/an	Ecoulement souterrain	
		%	Km^3/an
Europe	3210	35	1120
Asie	14410	26	3750
Afrique	4570	35	1600
Amérique du nord	7450	29	2160
Amérique du sud	11760	35	4120
Australie	2390	25	575
Total moyen		30	13320

Tableau 6.3: écoulement total naturel moyen et écoulement souterrain dans les grands continents.

6.2. Qu'est ce qu'un aquifère ?

Bien que l'eau souterraine existe partout dans le sous-sol, certaines parties de la zone de saturation contiennent plus d'eau que d'autres. Un *aquifère* est une formation souterraine de roche perméable ou de matériau meuble qui peut produire des quantités utiles d'eau lorsqu'elles sont captées par un puits. Les aquifères existent dans toutes les dimensions. Ils peuvent être petits, ne couvrant que quelques hectares de superficie, ou très grands, sous-jacents à des milliers de kilomètres carrés de surface terrestre. Ils peuvent avoir seulement quelques mètres d'épaisseur ou mesurer des centaines de mètres du haut vers le bas.

6.2.1. Identification géologique de l'aquifère

L'identification d'un aquifère repose sur trois critères géologiques, hydrodynamique et hydro chimique.

L'alimentation, le stockage et l'écoulement de l'eau souterraine sont imposés en premier lieu par la géologie.

Un aquifère est un système hydrogéologique identifier par un domaine d'espace souterrain fini est continu appelé **réservoir**.

Le réservoir est caractérisé par trois ensembles de données

- Sa configuration (ou enveloppe) décrivant son contour, ses dimensions (volumes) et la nature de ses limites géologiques.
- Sa localisation dans le sous-sol par l'altitude et la profondeur des limites géologique.
- Sa structure (ou anatomie) déterminée par la lithologie et l'analyse structurale.

6.2.1.1. Surfaces limites d'un réservoir

Les surfaces limites du réservoir ; inférieur (substratum), supérieur (toit) et latérale (affleurement, passage latérale de faciès, failles) identifient les conditions aux limites géologiques.

La morphologie des surfaces limites est représentée par des cartes structurales en courbes **isohypses** (égale altitude) et l'épaisseur par des cartes en courbes **isopaches** (égales épaisseurs).

6.2.1.2. Structure du réservoir

La sédimentologie, la pétrologie, l'analyse structurale et la géochimie déterminent les caractéristiques physiques et chimiques du réservoir (structure). Une importance particulière pour la granulométrie et la fissuration.

On distingue deux types principaux de réservoir d'eau souterraine

- Les aquifères homogènes ou continue a perméabilité d'interstice, sont constitués de sable, gravier, gré... c'est le cas des nappes alluviales qui occupent les fonds de vallées et d'une partie des nappes des grands bassins sédimentaires. Les vitesses d'écoulement sont généralement lentes.
- Les aquifères hétérogènes ou discontinus à perméabilité de fissures sont surtout constitués de calcaires mais également de roches volcanique granitique ou gréseuses.

Dans les massifs calcaires les fissures sont souvent ouvertes (aquifère de type karstique) et constituent de véritables conduites souterraines dans lesquelles la vitesse peut être très grande.

6.3. L'eau souterraine – un maillon essentiel dans le cycle hydrologique

La circulation de l'eau souterraine fait partir du cycle hydrologique. Les précipitations et d'autres sources d'eau de surface alimentent l'eau souterraine qui se draine constamment, et parfois très lentement, vers son points de déversement.

L'eau souterraine ne reste pas en permanence dans le sous-sol et elle ne constitue pas toujours des réserves exploitables à volonté par des puits. Le cycle hydrologique est la série de transformations qui se produisent dans la circulation de l'eau de l'atmosphère vers la surface et dans les régions souterraines de la terre, puis de nouveau de la surface vers l'atmosphère. Les précipitations se transforment en eau de surface, en humidité du sol et en eau souterraine. L'eau souterraine circule à nouveau vers la surface, et, de la surface, toute l'eau retourne à l'atmosphère par évaporation et transpiration.

Lorsque les précipitations tombent à la surface du sol, une partie de l'eau se déverse dans les lacs et les cours d'eau. Une certaine partie de l'eau provenant de la fonte des neiges et des précipitations s'infiltré dans le sol et percole dans la zone de saturation. Ce processus s'appelle *l'alimentation*, et les endroits où il se produit s'appellent *zones d'alimentation*.

Cette eau peut finalement réapparaître au-dessus du sol. C'est *l'émergence*. L'eau souterraine peut se déverser dans les cours d'eau, les marais, les lacs et les océans, ou bien son émission peut se présenter sous forme de *sources* et de *puits jaillissants*.

L'émergence de l'eau souterraine peut contribuer considérablement à l'écoulement de l'eau de surface. Durant les périodes sèches, le débit de certains cours d'eau peut être entièrement alimenté par l'eau souterraine. En tout temps de l'année, en fait, la nature des formations souterraines exerce un effet marqué sur le volume du ruissellement. Tandis que le débit d'émergence détermine le volume d'eau circulant de la zone de saturation vers les cours d'eau, le taux d'alimentation détermine le volume d'eau s'écoulant à la surface. Lorsqu'il pleut, par exemple, le volume de l'eau se déversant dans les cours d'eau dépend de la quantité de précipitations que les matériaux souterrains peuvent absorber. Lorsque la quantité d'eau à la surface est supérieure à la capacité d'absorption des matériaux souterrains, elle se déverse dans les cours d'eau et les lacs.

Le *temps de séjour* de l'eau souterraine, c'est-à-dire la durée pendant laquelle l'eau demeure dans la portion souterraine du cycle hydrologique, varie énormément. L'eau peut demeurer seulement quelques jours ou quelques semaines dans le sous-sol, ou jusqu'à 10 000 ans ou plus. Les temps de séjour de dizaines, de centaines ou même de milliers d'années ou plus ne s'ont pas exceptionnels. À titre de comparaison, le temps de renouvellement de l'eau de rivières, ou le temps que met l'eau des rivières à se remplacer complètement, est d'environ deux semaines.

6.4. Origine des eaux souterraines dans le Hoggar. [13] ; [14] ; [15] ; [29]

Hypothèse précédente.

Dans les milieux arides, l'alimentation des eaux souterraines peut être liée à des facteurs très variables dans le temps et dans l'espace. À cet effet il est nécessaire de prendre en considération les observations faites dans le chapitre relatif à la climatologie.

Les eaux souterraines qui se trouvent dans les formations volcaniques de la région de Silet pourraient être alimentées soit directement par l'infiltration des pluies dans la zone d'affleurement par les nappes d'inferoflux des oueds qui s'écoulent dans la zone.

Les nappes d'inferoflux localisés essentiellement dans la partie centrale du Hoggar, là où l'altitude est la plus élevée devrait être annuellement alimenté par des pluies saisonniers à travers l'infiltration des eaux superficielles de crue, surtout durant les phénomènes de grande pluies ; qui se produiraient avec une périodicité de 8 à 10 ans.

L'infiltration actuelle peut être compliqué par l'effet de drainage ou d'alimentation des failles régionales qui semblent faire fonction de collecteurs hydraulique.

Les eaux souterraines qui se trouvent dans les formations cristallines ne devraient pas être **actuellement sensiblement renouvelées** mais elles représentent les résidus d'anciennes alimentations.

6.5. Conditions hydrogéologiques de la région. [28], [29]

Si l'on peut considéré le massif montagneux du Hoggar comme un aire d'alimentation des eaux souterraines dans l'ensemble de la région de Tamanrasset est celle de transit de ces eaux vers les régions de décharge souterraines dans les pays plat contournant le Hoggar.

Le massif montagneux du Hoggar centrale est une région a une quantité assez grande des précipitation atmosphérique environ 50 millimètres ce qui conditionne ici l'existence des bassin superficielles (guelta) et l'alimentation périodique des eaux souterraines dans l'aire de transite.

Les particularités climatiques de la région (variation brusque de la température) contribue à l'altération intensive physique des roches et la formation d'une croûte d'altération d'une puissance considérable.

Cette zone exogène fissurée est considérablement compliquée des failles tectoniques qui jouent le rôle des grains d'infiltration et de transit des eaux à partir des aires d'alimentation aux zones de décharges.

La présence des matériaux détritiques et les zones puissantes d'altération dans l'ensemble de la superficie de réception d'eau du Hoggar centrale favorisant la rétention d'une partie d'écoulement superficiel des précipitations atmosphériques et leurs infiltrations vers les niveaux inférieurs.

D'après l'ouvrage de A.Cornet : « le débit du courant de l'oued de Tamanrasset est de 21.5 l/s sur la surface du bassin de réception d'eau égale a 250km² ; oued Tit est 68.4l/s sur la surface du bassin égale a 143km² ; oued Outil sur la surface du bassin de 570km² le débits est de 22.5l/s.

A moins que des données reflètent objectivement la situation hydrogéologique du terrain elles témoignent des réserves élevées en eaux de cette zone du Hoggar central.

Les collecteurs correspondant étant données dans les oueds, ces courants d'eaux dynamiques peuvent formes des réserves considérables d'eaux souterraines.

L'intervalle supérieur de ce complexe aquifère comprend le plus souvent des sables hétérogènes, feldspathique et quartzeux ; renferment dans leurs parties inférieures une grande quantité de matériaux détritiques. Plus bas suit la zone des roches cristallines détruites du socle (granites, granito gneiss, quartzites et autres.).

La puissance des dépôts fluviaux varie de 8 à 20m ; avec cela on observe dans différents endroits des changements considérables du degré de fissuration des roches de fond ce qui influe sur les propriétés des collecteurs de ces terrains.

La masse d'eau importante n'est liée qu'avec la partie inférieure du complexe aquifère c'est-à-dire les roches sous jacentes fissurées du socle.

Les collecteurs les plus puissants sont associées aux zones, plutôt aux nœuds d'intersection de plusieurs accidents tectoniques qui ont prédéterminés les déformations considérables en surface et en profondeur des roches de fond.

La formation des eaux souterraines de ce complexe aquifère est due à l'infiltration des précipitations atmosphériques. Leurs accumulations sont dues partiellement à une migration verticale à travers l'assise des dépôts sableux des oueds pendant des crues, mais principalement elles s'accumulent grâce à un ruissellement suivant les pentes des roches de fissure entourant l'oued.

Les niveaux de ces eaux varient de 3-5 m jusqu'à 18-20m, dans la région les eaux souterraines sont extraites à l'aide des puits, des fougares et rarement par des sondages, ce genre de captage obtient une quantité négligeable des réserves en eau souterraines.

6.6. Conditions générales pour la présence d'aquifère.

La présence d'eau dans les formations cristallines est essentiellement liée aux phénomènes de **la fracturation**. Étant la porosité primaire presque nulle (espace intergranulaire).

La condition nécessaire pour que les espaces vides formés par effet de la fracturation soient le lien de circulation active d'eau et que la roche ne subisse pas de phénomènes de dégradation météorique très forte, avec la formation de matériaux argileux qui pourraient naturellement l'imperméabiliser. Normalement la roche intensément fracturée est perméable lorsque les produits argileux ont été enlevés sous l'effet d'un intense lessivage.

6.7. hydro climatologie [17] ; [27] ; [28] ; [29]

6.7.1. Climatologie

La région étudiée est soumise à un climat **aride** influencé par les régimes **soudano sahariens** et méditerranéens.

Les températures les plus faibles sont enregistrées entre les mois de novembre et février ; durant cette période les moyennes mensuelles restent supérieures à 10°C à Djanet et Tamenrasset.

La série moins longue de l'Assekrem a mis en évidence des moyennes entre 6°C en Janvier et 19°C en Juin et juillet. La station de Djanet enregistre les températures les plus élevées entre mai et août, de l'ordre de 30°C.

station \ Mois	S	O	N	D	J	F	M	A	M	J	J	O
TAMANRASSET (1951-1988)	26	22	17	13	13	15	18	27	26	29	29	28
ASSEKREM (1970-1980)	17	14	9	7	6	8	10	14	17	20	19	19
DJANET (1951-1985)	25	19	14	13	16	20	25	27	32	31	30	29

Tableau 6.4 : Températures moyennes mensuelles (°C)

L'évaporation est de l'ordre de 3.8 m en moyennes par an à Tamanrasset et de 3.2m par an à l'Asskrem. Le régime pluviométrique est caractériser par d'importantes irrégularités interannuelles : les séries pluviométriques montrent une alternance de 2 à 3 années sèches suivies d'une année humide dont les valeurs de précipitations peut atteindre le double de la valeur moyenne calculé sur 20 années d'observation.

Les moyennes annuelles des précipitations peut atteignent 100mm dans la zone de plus de 2500 m d'altitude du massif de l'Atakor ,50 mm seulement au pied du massif ,à Tamanrasset à 1376 m d'altitude et moins de 20mm sur le reste de la région . (Voir figure 6.1).

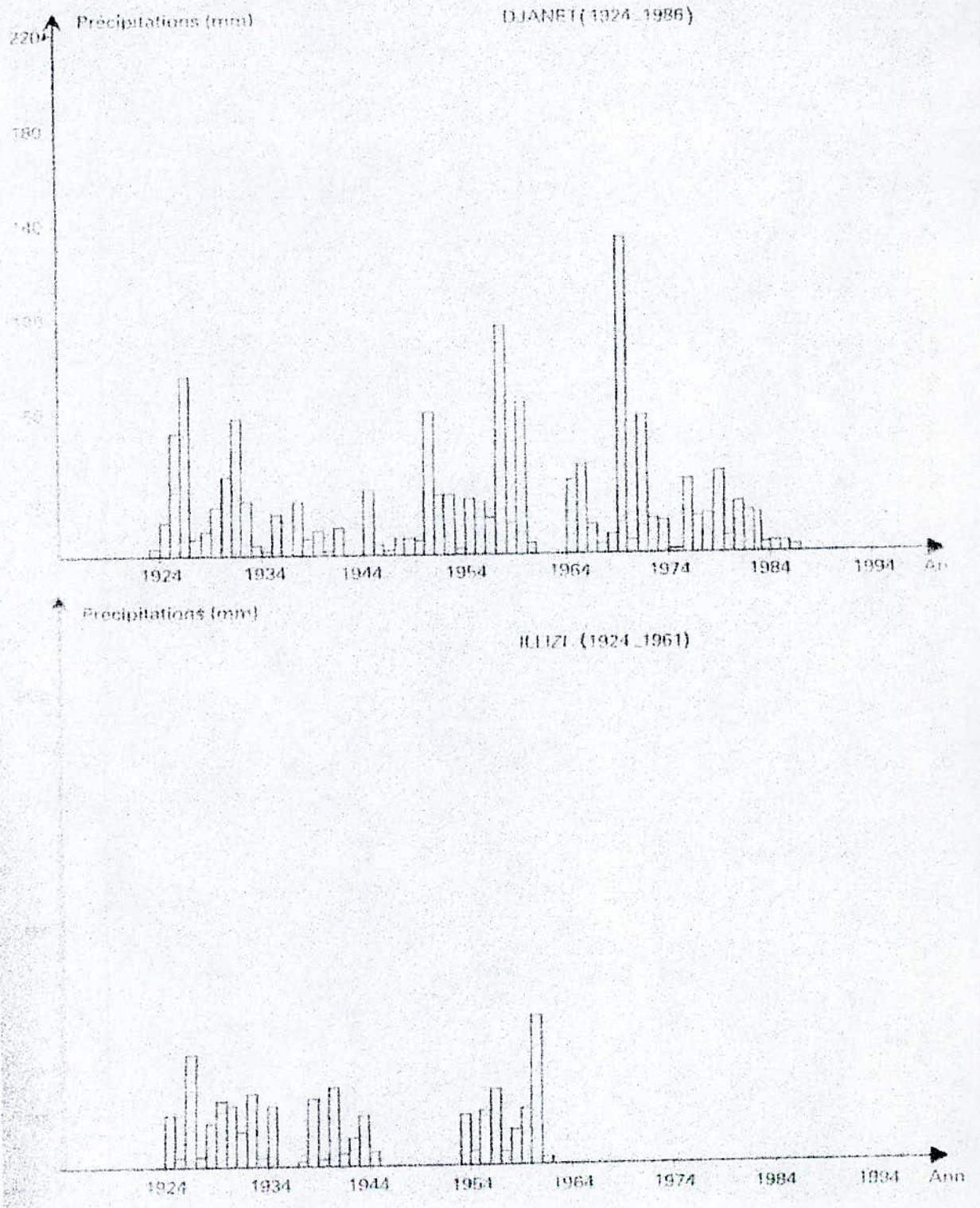


Figure 6.5 : Histogrammes de précipitation (Djanet, Illizi).

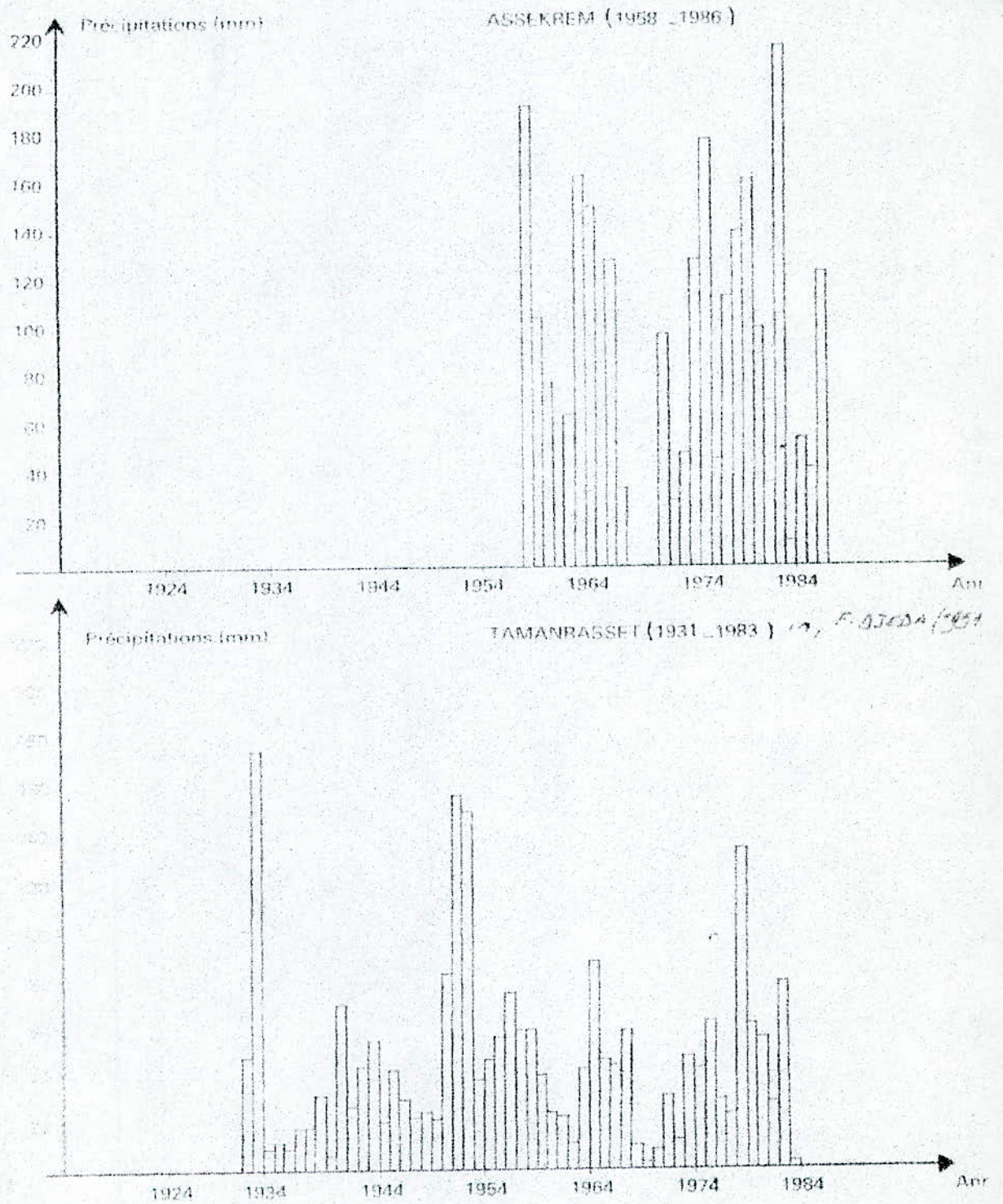


Figure 6.6. Histogrammes de précipitation (Assekrem, Tamanrasset).

La répartition des pluies à l'échelle de l'année est liée à l'arrivée de la mousson soudanaise sur le Hoggar.

La période des pluies dans le centre du Hoggar, à Tamanrasset (1376) et sur l'Atakor, à l'Asskrem (2716 m) marqué par des valeurs de précipitation moyennes mensuelles les plus élevées s'étale entre mai et septembre.

6.7.2. Hydrographie et hydrogéologie de surface

6.7.2.1. Structure du réseau hydrographique et des bassins versants.

Les oueds du Hoggar présentent une particularité dans leurs morphologies : leur tracé débute sur les parties élevées du massif par une pente forte et un lit bien marqué et relativement encaissé sur quelque dizaine de kilomètre par rapport aux oueds tassiliens qui descendent des reliefs de l'altitude moins élevée.

Ces oueds finissent souvent par traverser dans leur cour aval aplani et profondément dégradé les surfaces aplani de regs et leur tracé devient difficilement identifiable.

6.7.2.2. Les écoulements superficiels. [15], [22], [27]

Les écoulements superficiels permanents générés par les eaux météoriques sont **quasi inexistant** : les ruissellements occasionnels de courte durée se produisent toutes les deux ou trois années à la suite d'averse torrentielles. Une crue dure généralement dans la région du Hoggar quelques heures voire une journée, très rarement 3 à 4 jours.

Voici un rapport Observation d'une équipe de travaux de recherche de la SONAREM présente à Tamanrasset lors d'une pluie battante le 05 mai 1975 :

« Une pluie fine précédent avait durée avec des intervalles d'environ 6heurs ce qui a donner naissance à une accumulation d'eau dans des endroits bas des oueds

La pluie battante avait continuée d'environ 1.5 heure ; elle était si intense qu'elle a obligée l'arrêt des travaux de forages dans les oueds Tifgougin.

Après 30-40 minutes de l'averse un torrent de 5 à 25 centimètre de profondeur.

La profondeur du torrent dans l'oued Tamanrasset (dans les limites de la ville) atteignent de 30-40 centimètres avait rendu difficile le passage du transport dans 2 ou 3 heures après la pluie des courant d'eau sont pratiquement disparue. »
Le tableau suivent illustre les fréquences de mois de crue sur 100 ans, à Tamanrasset.

	J	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D	total
	Fréquence des mois de crues à Tamanrasset soit après 60 Km de parcours												
	1- entre 1927 et 1950												
Nombres de mois pour 100 ans	3	0	0	2	2	2	6	8	6	3	0	0	32
	13	0	0	8	8	8	25	33	25	13	0	0	133
	2- entre 1901 et 1950												
Nombre de mois (avec réserve) pour 100ans	4	1	0	3	4	3	7	11	12	5	1	2	53
	8	2	0	6	8	6	14	22	24	10	2	4	106

Tableau 6.7 : Fréquence des mois de crues à Tamanrasset

Il est évident que l'extension d'une crue le long d'une vallée est liée à l'intensité et à la durée de l'averse tombée sur le territoire du bassin correspondant.

Date	Précipitation (mm)	Durée (Min)	Intensité (mm/min)	Observations
05-08-1932	12.5	45	0.28	Forte : l'oued coule sur sa largeur à Tamanrasset
22-05-1933	20.0	30	0.66	Forte : l'oued coule sur sa largeur à Tamanrasset.
24-05-1933	47.1	85	0.55	Forte : crues exceptionnelles des oueds Outoul, In Amguel, In Ecker.
13-09-1950	37.0	40	0.92	Forte : atteint l'erg de Ti-M-Missaou, l'oued Amded attsa confluence avec le Tamanrasset

Tableau 6.8 : caractéristiques de quelques crues connues à Tamanrasset

Il est important de noter que la quasi pérennité des oueds dans les Tassilis est liée aux conditions hydrogéologiques locales particulièrement favorables

PARTIE 2
MATERIELS ET METHODES

CHAPITRE 1
Présentation d'outils de travail

1.1. MapInfo Professional est un puissant outil de représentation et d'analyse géographique, MapInfo Professional comporte sa propre base de données. Il peut également interopérer avec les bases de données Access, Oracle ou d'autres. Il vous permet d'effectuer des analyses détaillées et sophistiquées des données, pour mieux comprendre le marché grâce à l'éclairage géographique.

L'information localisée est essentielle à l'aide à la décision. Elle illustre brillamment vos documents et vos rapports.

Une série de nouvelles fonctions et d'extensions fournies avec la version 6.5 de MapInfo Professional facilitent la cartographie et l'analyse des données à l'échelle du PC ainsi que pour l'ensemble de l'entreprise.

1.2. Caractéristiques

- Données géographiques en couches et attribut liées aux objets de la carte.
- Cartes thématiques et modèles d'analyses thématiques.
- Support d'Internet par des Hotlinks inclus dans la carte pour l'accès direct à des sites Web ; diffusion de cartes en HTML (ImageMap).
- Légendes cartographiques et thématiques basées sur les données.
- Support des images raster y compris les format BMP, JPG, PCX, TIFF, MrSID, ECW (ER Mapping).
- Outils de géocodage.
- Création et sauvegarde de requêtes SQL.
- Support de access2000, 97 et 95 y compris en multi-utilisateurs.
- Recherches géographiques.
- Seagate Crystal reports intégré.
- Accès en ligne aux bases de données spatiales.
- Gestion des conflits en mode multi utilisateurs.
- Enregistrement et gestion des données en local ou sur serveur.
- Traducteur universel pour les formats Autodesk, Esri, Intergraph, VPF et SDTS.

1.3. MapInfo Professional 6.5 : la nouvelle version est déjà disponible en français, en anglais, en allemand et dans plus de 15 autres langues. De nouvelles fonctionnalités rendent MapInfo Professional encore plus performant et convivial : intégration à Internet, puissantes représentations d'objets composés, compatibilité avec Oracle 8i, et 9i spatial, vues spectaculaires en trois dimensions, gestion avancée de la topologie, etc.

1.3.1. Les nouveautés de la version 6.5

- Cartes prismatiques mettant une région de la carte en relief.
- Support de Oracle 8i, et 9i spatial.
- Vues stéréoscopiques 3D.
- Interpolation des grilles.

- Fonctions topologiques avancées.
- Création de symboles personnalisés proportionnels à l'échelle.
- Images raster translucides permettant de les superposer.
- Objets composés de points multiples ou de polygones.
- Inversion des sélections.

CHAPITRE 2
Modélisation numérique du terrain.

2.1. Introduction

Le but principal de la modélisation de terrain est de représenter la surface naturelle de la terre. En général, un Modèle Numérique de Terrain (MNT) (ou Digital Elevation Model, D.E.M.) contient plusieurs points significatifs. Différents algorithmes permettent d'interpoler l'élévation de tout point dont la position est connue. Ceci permet la création d'un quadrillage régulier d'élévations. Les valeurs ainsi obtenues, soit les Données Numériques d'Elévations (DNE) du terrain, ont révolutionné l'analyse topographique et la représentation graphique. Pour traiter l'information il faut des notions d'informatique, de mathématiques et de génie. Un MNT peut contenir plusieurs éléments géographiques et naturels, tels: les rivières et les fleuves, les crêtes de montagne. Il peut aussi contenir plusieurs informations dérivées intéressantes, soit les pentes, l'apparence, la visibilité, etc. La manipulation des données dans un système informatique est simple. En effet, les Données Numériques d'Elévations sont conservées dans des matrices, où le positionnement du point terrain interpolé est relié à sa position dans la matrice.

La modélisation de surface est la représentation d'une surface, naturelle ou artificielle, au moyen d'un modèle géométrique ou d'une expression mathématique. Les MNT sont une application particulière de modélisation de surface. Contrairement à la modélisation de surface, où une seule expression mathématique peut représenter le champ d'intérêt, c'est presque impossible de définir précisément la structure d'un terrain par une simple fonction mathématique. Conséquemment, plusieurs approches différentes ont été développées.

L'objectif de ce cours est de présenter différentes méthodes simples pour établir des MNT à partir de mesures d'altitudes relevées sur le terrain ou sur des cartes. Nous verrons comment établir une grille où chaque intersection possède sa propre élévation, à partir d'un nuage de points relevés (X, Y et Z).

2.2. Historique

L'ancêtre de la modélisation de terrain est **Alexandre von Humbolt**, un géographe allemand. Ses travaux ont débuté au 19^{ème} siècle et ont été poursuivis par plusieurs de ses confrères géographes. Le terme Modèle Numérique de Terrain (MNT) est attribué à deux ingénieurs américains, **Miller et La Flamme** en 1958. Ils ont énoncé ce qui suit: "**Le modèle numérique de terrain (MNT) est simplement une représentation statistique de la surface continue du sol, par un grand nombre de points choisis, connus en X, Y et Z, dans un système de coordonnées arbitraire.**" Ce travail de Miller et La Flamme était plus spécifiquement dédié à l'usage de **sections** pour définir le terrain. Depuis ce temps, plusieurs autres définitions ont été utilisées pour décrire les Modèles Numérique d'Elévations (MNE) ou les Modèles Numériques de Terrain (MNT).

La cartographie assistée par ordinateur connaît ses origines en 1959 grâce à un étudiant gradué de l'Université de Washington, **Waldo Tobler**. Il a publié un article intitulé: "Automation and Cartography". Dans les années '60, des algorithmes sont développés pour accomplir automatiquement ce qui était effectué manuellement au paravent. Par exemple, les lignes de contour doivent refléter la situation réelle. Les inscriptions doivent être placées à des endroits adéquats, en évitant la superposition.

Les ordinateurs ont apporté la **vitesse** à la cartographie. En effet, les éléments de base n'ont pas à être redessinés. Ils sont simplement copiés. Les ordinateurs ont aussi apporté la **précision**. En effet il est maintenant possible de calculer très précisément des aires et des volumes avec les logiciels adéquats. Cependant cela n'assure pas que les résultats sont exacts. La cartographie numérique nous permet d'avoir des **données précises et exactes**. Malheureusement, ce n'est pas toujours le cas. Lorsque la numérisation de données se fait à partir d'un feuillet cartographique, la **cartographie numérique peut devenir la reproduction précise et exacte des erreurs de tracé de la carte d'origine**. C'est donc important de connaître l'incertitude reliée aux données. L'avènement des systèmes de positionnement par satellite (GPS) a aussi influencé grandement la cartographie. Il est maintenant possible de connaître la position d'un point en latitude, longitude et élévation à 10 mm près. C'est assez précis pour évaluer la dérive des continents. Cette nouvelle technologie nous permet de positionner les objets avec un nouveau niveau d'exactitude. Le positionnement par GPS a donc apporté l'exactitude et la précision.

2.3. Les champs d'application de la modélisation numérique de terrain

Les techniques de modélisation de terrain sont très populaires dans les sciences de la physique et de la terre. De plus en plus, les applications informatiques traitant des données géographiques nécessitent l'utilisation d'un Modèle Numérique de Terrain (MNT).

2.3.1. La cartographie numérique

Dans certains, la cartographie (numérique ou classique) sert de base à la modélisation de terrain. Cela se produit lorsque le MNT est bâti à partir d'un feuillet cartographique numérisé. Dans d'autres cas, les MNT permettent de donner naissance à des produits cartographiques numériques. Cela se voit lorsqu'on déduit les lignes hypsométriques à partir d'un modèle numérique de terrain. En plus de reproduire les lignes de base, il est facile d'en ajouter selon nos besoins.

2.3.2. Les Systèmes d'Information Géographiques (SIG)

Les Systèmes d'Information Géographique (SIG) permettent ensuite de combiner la modélisation de terrain avec des données non topographiques. Les résultats sont rangés dans des bases de données. Celles-ci permettent d'établir les relations entre les différents éléments.

2.3.3. La géomatique

Les représentations digitales du terrain forment un des principaux éléments de la géomatique. On peut utiliser la modélisation de terrain autant à grande échelle (pour un site spécifique) qu'à petite échelle (pour des plus grandes surfaces). Dans tous les cas, il est toujours intéressant de pouvoir visualiser les régions étudiées. Puisque les géomaticiens sont des spécialistes de la mesure, ils fournissent souvent les résultats nécessaires aux autres professionnels.

2.3.4. La foresterie

De plus en plus, les ingénieurs forestiers utilisent les MNT pour différentes études. Ils peuvent étudier la croissance des arbres en fonction des pentes ou de l'ensoleillement. Ils peuvent décider d'exploiter des zones de coupe en fonction des cartes de visibilité. Ils peuvent même faire de l'inventaire forestier 3D, afin de connaître les populations forestières en relation avec le relief du sol.

2.3.5. Le génie civil

Les modèles numériques de terrain sont fréquemment utilisés en génie civil. Au départ, ils étaient réservés pour les calculs de remblais et de déblais, lors de la construction d'autoroutes. Aujourd'hui, ils sont utilisés dans les projets linéaires (routes et voies ferrées) et les projets de grande étendue (développement régional et national). De plus, les techniques de modélisation peuvent aussi être utilisées pour créer des modèles numériques de structures particulières, telles les routes, édifices, etc. La possibilité de fusionner la modélisation de structures et la modélisation de terrain rend possible la représentation fidèle de l'impact environnemental des projets de génie civil.

2.3.6. L'hydrographie et la bathymétrie

On peut produire des modèles, à petite échelle, du fonds marin, en utilisant les données fournies par des écho-sondeurs. Comparé avec leur équivalent topographique, c'est moins facile d'obtenir les résultats ou de voir le fonds marin. C'est difficile de localiser et de mesurer des lignes importantes du terrain, tels les crêtes et les failles. Malgré tout, des modèles numériques du fonds marin sont développés, afin d'analyser un site marin avant la construction d'une structure en mer.

2.3.7. La géologie et la géophysique

La géologie est une discipline qui utilise la modélisation de terrain depuis longtemps. En plus de la modélisation de surface, des modèles de strates géologiques sont aussi créés. Ces modèles sont développés à l'aide de données obtenues par forage. En effet, les carottes (échantillons cylindriques de terrain prélevé en profondeur à l'aide d'un carottier) permettent de connaître la composition du sol. Puisque l'échantillon est positionné (X et Y), on peut déduire l'altitude des différentes strates. Pour ce qui est du cas particulier des failles, des techniques particulières ont été développées par des géologues.

Les domaines de l'exploration et de la cartographie géophysique utilisent fréquemment la modélisation de terrain. Plusieurs contributions ont été faites, dans les théories et techniques de base, par des géophysiciens.

2.3.8. Le génie minier

En génie minier, l'application de la modélisation de terrain est semblable à celle de la géologie et de la géophysique. Là encore, les données utilisées sont regroupées et rares. En conséquence, beaucoup de travail a été fait par les ingénieurs miniers avec cette sorte de données. En particulier, le travail fait par Krige est bien connu et a conduit au terme krigeage.

Il intervient fréquemment dans toutes les formes de modélisation et d'interpolation. Une autre application, dans ce domaine, est la modélisation numérique d'inventaire de minerais, pour en donner le volume estimé.

2.3.9. La simulation et visualisation de terrain

Plusieurs personnes pensent que la modélisation de terrain la plus avancée et sophistiquée est dans la simulation et la visualisation de terrain, particulièrement pour la simulation de vol et de radar. Dans le premier cas, les représentations fidèles de la surface de la terre, dérivées des modèles numériques de terrain, sont combinées avec le besoin de simulation, en temps réel, de la vision du pilote qui se déplace. Finalement, la modélisation de terrain utilisant les fractales sert à produire des vues de surfaces artificielles. C'est particulièrement intéressant dans le domaine d'animations et de graphiques informatisés.

2.3.10. Le génie militaire

La connaissance du terrain est d'une importance vitale pour les militaires. Ce n'est pas surprenant que des efforts importants et des gros investissements ont été faits dans la recherche et le développement des applications militaires de modélisation de terrain. On l'utilise, entre autres, pour établir la vue du terrain à partir d'un point particulier. Ceci permet de déterminer la position optimale des radars, de lancer des missiles sol-air ou des équipements de communication. Avec les cartes de pentes, on peut aussi optimiser les déplacements avec des véhicules routiers ou hors routes. Des systèmes sophistiqués de guidage de missiles peuvent utiliser la modélisation pour contourner les obstacles. Les simulations de combat sont aussi très importantes.

2.4. Définitions

Le terrain est défini comme l'espace de la terre considéré du point de vue de sa nature, de sa structure et de son relief. C'est la surface solide de la terre entière ou d'une partie de celle-ci.

2.4.1. Les Données Numériques d'Élévations (DNE)

Pour un MNT, les DNE sont les hauteurs des points au-dessus d'un niveau de référence absolu, habituellement le Niveau Moyen des Mers.

Les données numériques d'élévation sont constituées de quadrillage d'élévation de terrain à intervalles réguliers. Elles comprennent aussi, comme sources des données d'élévation, des points de contrôle d'aéro-triangulation et des points de contrôle géodésiques.

2.4.2. Les Modèles Numériques de Terrain (MNT)

C'est un concept plus complexe et plus global qui ne traite pas seulement de hauteurs et d'élévations mais d'autres éléments géographiques et caractéristiques naturelles telles les rivières, les crêtes, etc. Dans le sens le plus étroit, un MNT représente seulement le relief du terrain. Cependant, dans sa forme la plus générale, un MNT contient des données de planimétrie et de relief. Cependant, contrairement aux autres définitions, cette représentation peut aussi inclure des données dérivées sur le terrain, tel la pente, l'apparence, etc.

2.4.3. Les Modèles Numériques de Surface (MNS)

Un Modèle Numérique de Surface est une grille régulière qui possède en chaque point une élévation. Habituellement utilisée en milieu urbain, cette grille affiche les altitudes du terrain naturel ou des structures artificielles. On y retrouve les bâtiments, les routes, les arbres, etc.

2.5. Acquisition des données

Les données nécessaires à la construction d'un modèle numérique de terrain peuvent être de sources très diverses. En effet, la base de données altimétrique peut être obtenue par de nombreux moyens et procédés et cela selon le but recherché :

a) à partir de relevés sur le terrain en procédant à des mesures topographiques à l'aide d'un appareil appelé théodolite. Cette méthode a l'inconvénient d'être très lente à réaliser mais représente l'avantage d'être très précise.

b) à partir de la numérisation des courbes de niveau d'une carte topographique en utilisant la table à digitaliser. Cette méthode est extrêmement pratique lorsque on s'intéresse à une zone d'étude de taille relativement modeste.

c) à partir des images satellites et radar : ce sont les méthodes les plus répandues de nos jours.

2.5.1. Sources d'informations

a) Cartes topographiques

Les cartes topographiques représentent les documents de base pour l'établissement des MNT. La saisie des courbes de niveau qui sont des informations essentielles peut se faire de deux (02) manières différentes :

- Digitalisation ;
- Scannage.

Le **scannage** est défini par le CNIG (Conseil National de l'Information Géographique) comme étant 'la numérisation automatique par balayage d'un document graphique en un fichier informatique décrivant une matrice composée d'une trame de points d'intensités lumineuses et de couleurs différentes'. Le fichier obtenu est un fichier Raster.

Après le scannage on obtient une image constituée d'un seul bloc. Un point donné de cette image est appelé '**Pixel**' (contraction de Picture Element); dans les certaines documentations françaises, on emploie parfois le terme Tachelle.

b) Photographie aérienne

La photogrammétrie constitue la source principale et la plus précise pour la réalisation d'un MNT. Les développements récents de la photographie digitale font de cette technique un outil de plus en plus utilisé. Cet outil est utilisé pour plusieurs fins à savoir :

- a- quantification des volumes déplacés lors d'avalanche de neige ;
- b- suivi cartographique des bassins versants et leurs analyses paysagères ;

- c- modélisation hydrologique ;
- d- suivi de l'évolution de mouvements de terrain.

L'information topographique est numérisée à partir des photographies aériennes en utilisant des appareils spéciaux appelés : Stéréoréstituteurs (appareils de restitution photogrammétrique). Le relief est en général restitué sous le forme de courbes de niveau ce procédé à l'inconvénient d'être très coûteux et très long.

c) Imagerie satellite

La réalisation automatique des MNT à partir de deux scènes du satellite SPOT formant un couple stéréoscopique est rendue possible grâce aux stéréoréstituteurs analytiques et moyennant quelques changements de logiciels pour l'adaptation à la géométrie des images de satellites.

2.6. Représentation matricielle ou vectorielle

i) Représentation matricielle

Dans la représentation matricielle, les données sont régulièrement espacées, selon un quadrillage de base. Chaque élément de la carte devient un élément de la matrice. Connaissant les coordonnées des coins de la matrice, et l'espacement entre les éléments, il est possible de référer à une cellule de la carte par les numéros de lignes et de colonnes. Dans la modélisation numérique de terrain, par exemple, les élévations terrain pourraient être connues à tous les 30 mètres. Selon le produit désiré, on peut aussi tracer des cartes d'attributs tels, la pente maximale, l'orientation de la pente maximale, la nature du sol, la visibilité par rapport à un point d'observation, etc.

Il s'agit d'une grille régulière qu'on place sur la réalité qu'on cherche à représenter. Chaque maille a une valeur. Ces mailles correspondent aux pixels qui forment l'image.

On va adopter des codes pour la représentation (exemple : code 1 = il y a de l'eau). La dimension du pixel est le facteur-clé.

On va définir l'ordre dans lequel on va représenter les pixels : selon les logiciels, la coordonnée d'un point est celle du milieu du pixel ou du coin supérieur gauche de ce pixel.

C'est un système rigide du point de vue représentation géographique car on ne peut avoir qu'une valeur par pixel, contrairement au SIG vectoriel où, pour chaque objet, on peut avoir plusieurs types de variables. Il faut connaître le système de référence. Le mode de représentation matriciel sera utilisé pour des choses qui évolue. Enfin, on aura une image par niveau d'information (exemple : altitude, type de végétation, ...).

Avantages :

- Les images satellitaires, les orthophotos sont déjà sous forme d'image. On peut les traiter facilement.
- Les modèles numériques de terrain sont souvent sous forme matricielle.
- Il faut, en matriciel, définir la résolution.

- L'échange d'image est très standardisé. Il est facile de changer deux images entre deux logiciels.
- La plupart des algorithmes matriciels sont plus simples et donc moins chers à acheter que les logiciels vectoriels.

1. VALEURS des pixels

Ça dépend du nombre de bits (0 ou 1) et de bytes (octets). Un byte = 8 bits et donc, on $2^8 = 256$ combinaisons possibles pour coder l'information. On a donc les nombres entiers, de 0 à 255 qu'on pourra coder sur un byte.

On a les nombres entiers inférieurs à 65443 qui seront codés sur un short (2^{16}) qui est égale à 2 bytes.

On peut coder des valeurs en réel avec un certain nombre de chiffres après la virgule. On utilisera 4 bytes. Une image codée en réel prendra 4 fois plus de place qu'une image codée en bytes.

Taille des images

Ex : - 1024 x 1024 pixels codé en bits.

La taille en byte = $1024 \times 1024 / 8 = 131$ KB (exemple : présence de bois de feuillus)

- Occupation du sol (30 classes) : codé sur 1 byte
 $1024 \times 1024 = 1$ MB
- Altitude en Belgique en mètres : codé en short sur 2 bytes
 $1024 \times 1024 \times 2 = 2$ MB

Dans certains logiciels, on ne peut multiplier des bits avec des réels. Aussi, les nombres entiers représentent souvent des variables nominales.

Niveau d'information

Les cellules sont souvent carrées.

- Il faut connaître la résolution, l'orientation par rapport au Nord, le système de référence de l'image (pour pouvoir les juxtaposer).

Pour localiser l'image à la surface de la Terre, il faut : soit connaître la taille en X et en Y et un point en coordonnées géographiques.

- soit connaître X et Y en coordonnées géographiques (par exemple les deux coins)

Il y a un type de valeur par niveau. On va définir des valeurs.

Si on veut connaître une zone, il faudra la définir.

Opérations sur données matricielles

- Opérations locales pixel par pixel on peut avoir :

Transformations uni variées : on a une image en entrée, une en sortie et au milieu, on a une transformation. Par exemple, on rajoute une constante à tous les pixels de l'image.

Si on a différentes images en entrée, on peut avoir une seule image en sortie (exemple : l'indice de végétation).

On peut avoir autant d'images en entrée qu'en sortie (exemple : l'analyse en composantes principales)

Descripteur statistique. Exemple : le nombre de classes.

Descripteurs statistiques multi variés. Exemple : la covariance.

Toutes ces opérations peuvent être réalisées dans un SIG.

Opérations logiques : la plus simple qui n'utilise que l'égalité ou la différence

Exemple : si $G = 1$ ou $G = 3$ alors $G' = 1$, sinon $G' = 0$.

Combinaisons d'opérations logiques :

Exemple : on peut combiner les opérations «et », «pas », «ou », ... Si l'opération «and » est présente dans le logiciel, on peut par exemple reclasser tous les 7 en 1, tous les A en 1.

On peut aussi faire des classements où on va utiliser des égalités ou des < et >.

Rappel :

- Variable nominale = une catégorie
- Variable ordinale = variable dans laquelle il y a un ordre (exemple : des classes d'altitude)
- Variable cardinale (quantitative) = on peut faire des opérations mathématiques (+, -, x, :). Ça peut être des températures, des mètres, des personnes, ...

Dans le cas du classement, la variable doit au moins être ordinale. Par exemple, les classes d'altitude. On simplifie l'information de départ.

On peut aussi utiliser des fonctions : on peut par exemple essayer d'établir une relation linéaire entre les températures et les précipitations. Ainsi, on pourra connaître la valeur des précipitations pour chaque altitude. Ça n'a de sens que si la relation est bonne.

Pour reclasser une image, on peut définir un fichier texte. On aura une correspondance entre l'image en entrée et l'image en sortie sur base du fichier texte. Si on a différentes classes, on peut dire que les classes urbaines, on va les mettre à 0 et les autres, on les mettra à 1. On peut utiliser ce même genre de fichier texte pour stocker une information mathématique où on a par exemple multiplié toutes les valeurs de pixels par 3.

i) Représentation vectorielle

La représentation vectorielle, est la compilation d'une série de droites orientées différemment. Elle permet de bien représenter les éléments linéaires, tels : les rivières, les frontières ou les lignes de contour.

Elle consiste à représenter la réalité à l'aide de points, lignes, surfaces, chacun d'eux étant définis par des coordonnées X-Y. Ces coordonnées X-Y sont des valeurs continues, assez précises, encodées avec une fausse précision. Ça donne l'apparence que c'est toujours plus précis. Normalement, quand on zoom, on ne peut pas le faire à l'infini. En vectoriel, c'est possible, on n'aura pas l'impression d'atteindre une limite.

L'exploitation de ce type de structure est plus performante mais les algorithmes sont plus complexes et donc plus chers. On va structurer l'information en niveaux. Chacun d'eux va caractériser un thème et ce thème sera représenté par un type d'élément. Pour chaque thème, on aura un type de symbolisation. Ceci, c'est surtout pour les logiciels de dessin.

2.7. Eléments d'une base de données vectorielle

- ❖ **Points** : C'est l'objet le plus simple. La représentation ponctuelle varie selon l'échelle de représentation.

On a un fichier graphique où on a des points qui ont des coordonnées X-Y dans le système d'axes défini. Pour chaque point, on aura un identifiant.

On aura une table attachée à cette couche d'information et dans cette table, on a les identifiants, des points, et pour chaque point, on a une série d'attributs (= variables de n'importe quel type comme par exemple l'extension de la ville qui se rapportent à ces points).

- ❖ **Arcs** : lignes, courbes : Représentation de tous les réseaux (transports, eau, gaz, hydrographie). Tout dépend de l'échelle de représentation.

Arc = ensemble de segments de droite entre deux nœuds.

Nœud = intersection entre arcs ou fin d'arc.

On peut faire un tableau avec les différents attributs qui se rapportent à un tronçon particulier.

- ❖ **Les polygones** : ils sont adaptés à la représentation d'objets qui ont une certaine emprise au sol ou ayant des limites administratives.

Ça dépend de l'échelle. Ces zones peuvent ou non se recouvrir. Si on a un secteur statistique, on recouvre tout le territoire. Si on a des bâtiments, il peut y avoir des trous. Les inclusions ne sont pas faciles à gérer, notamment pour le calcul des surfaces. Par exemple, dans le cas de l'île au milieu du lac du bois de la Cambre, le logiciel ne va pas soustraire sa superficie. La gestion de ces inclusions se fait bien dans les SIG mais pas dans les logiciels de dessin.

2.8. Types de M.N.T :

Les différents types des modèles numériques de terrain M.N.T

Il existe quatre (04) formes différentes pour faire la représentation d'un modèle numérique de terrain qui sont :

- Grille régulière ;
- Contours (courbes de niveau) ;
- Grille triangulée
- Triangulated Irregular Network (T.I.N).

Les formes les plus utilisées et les plus importantes sont les M.N.T sous forme de grille régulière et le réseau irrégulier de triangulation (T.I.N).

1) M.N.T sous forme de grille régulière (raster)

Un M.N.T raster est une matrice d'altitude. il s'agit d'un ensemble de valeurs numériques représentant des altitudes, espacées de manière régulière et ordonnées selon un balayage du terrain (exemple : W-E ou N-S). Chaque valeur d'altitude représente *la moyenne d'un élément de surface de terrain*. Cette distribution de points définit alors : un maillage de la surface de la terre. Les dimensions de la maille de la maille définissent la *résolution spatiale planimétrique* du M.N.T. plus l'espacement des points est serré, plus la résolution est grande, plus le M.N.T est fin et riche en détails topographiques.

Les M.N.T raster peuvent être produit par différentes méthodes et à partir de source de données diverses :

6	9	9	11	12	12	12	12	9	6
9	15	16	18	21	21	19	20	15	8
10	18	22	25	26	26	25	25	20	11
11	19	27	29	30	31	29	28	23	14
11	20	28	33	35	34	34	31	25	13
12	22	29	34	37	37	35	32	24	13
12	22	29	33	35	36	34	29	24	14
9	17	25	29	34	34	32	28	23	13
7	13	18	22	27	27	26	23	18	11
5	8	10	14	15	16	14	12	11	6

Figure 2.1 : un MNT sous forme de grille régulière

1. à partir de courbes de niveau :

La numérisation des courbes de niveau d'une carte standard (topographique) (qui sont d'ailleurs des approximations du terrain loin d'être exacte) ; donnent un ensemble d'arcs. On détermine les intersections de ces arcs avec le maillage du M.N.T à produire. On obtient un ensemble de points cotés .cet ensemble sert de point de départ à une interpolation des altitudes, en moyennant un logiciel, en chaque point de maillage afin de produire l'ensemble du M.N.T recherché. **La précision obtenue est en moyenne égale à la demi équidistance entre les courbes initiales** (c'est à dire pour des courbes ayant une équidistance de 50m on obtient un M.N.T précis à 25m). Néanmoins, on peut améliorer cette précision en numérisant en plus

des courbes de niveau des points caractéristiques tels que les sommets, les lignes de crête, les fonds de vallée...

2. à partir de photographies aériennes

Dans ce cas, il s'agit d'un long travail de photo-interprétation à l'aide de couples d'images stéréoscopiques et d'un stéréoréstituteurs.

3. à partir d'images numériques (satellites)

Le calcul de l'altitude à partir d'un couple d'images stéréoscopiques numériques est dans ce cas réalisé à l'aide de méthodes automatiques de traitement d'images. le principe repose sur la recherche automatique pour un pixel de l'une des images de son homologue dans l'autre image du couple stéréoscopique. En connaissant la position des deux pixels, on en déduit la parallaxe et connaissant *l'altitude* et l'angle de prise de vue on en déduit l'altitude du point.

Dans ce cas, la grille peut être carrée ou rectangulaire. Il est largement utilisé pour les raisons suivantes :

- Sa simplicité ;
- Sa vitesse d'accès pour d'autres applications ;
- Disponibilité des données dans cette forme.

Néanmoins, il a comme inconvénient de ne pas s'adapter à la variabilité du terrain.

2) M.N.T sous forme de réseau irrégulier de triangulation (T.I.N) (vecteur)

L'autre alternative au mode Raster est une représentation vectorielle par une couverture polygonale. Dans le cas où le M.N.T est sous forme T.I.N les points qui sont irrégulièrement espacés sont connectés pour former un réseau de triangles selon le critère de triangulation de Delaunay (*les points sont reliés de manière à minimiser la dimension du cercle inscrit entre les trois points du triangle*).

Contrairement à la grille régulière, le T.I.N s'adapte mieux à la variabilité du terrain (un échantillonnage dense dans les zones à relief accidenté et moins dense dans les zones où le terrain est uniforme).

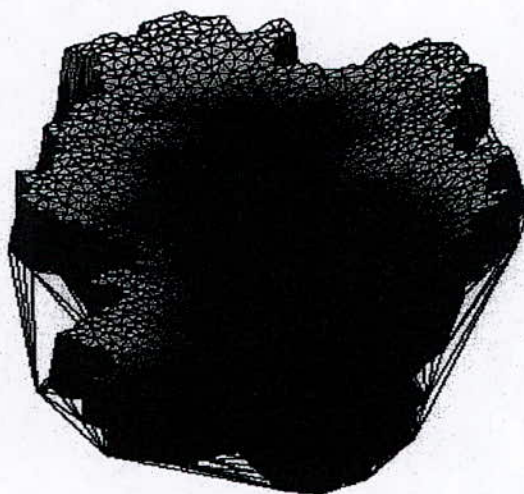


Figure 2.2 : un M.N.T sous forme de réseau de TINs

a) Contours

Les contours sont des poly lignes qui suivent la position d'une coordonnée Z donnée. En d'autres termes il s'agit de courbes de niveau interpolées a une certaine coordonnée qui est elle même lue sur un TIN ou une grille. L'interpolation des coordonnées Z est linéaire.

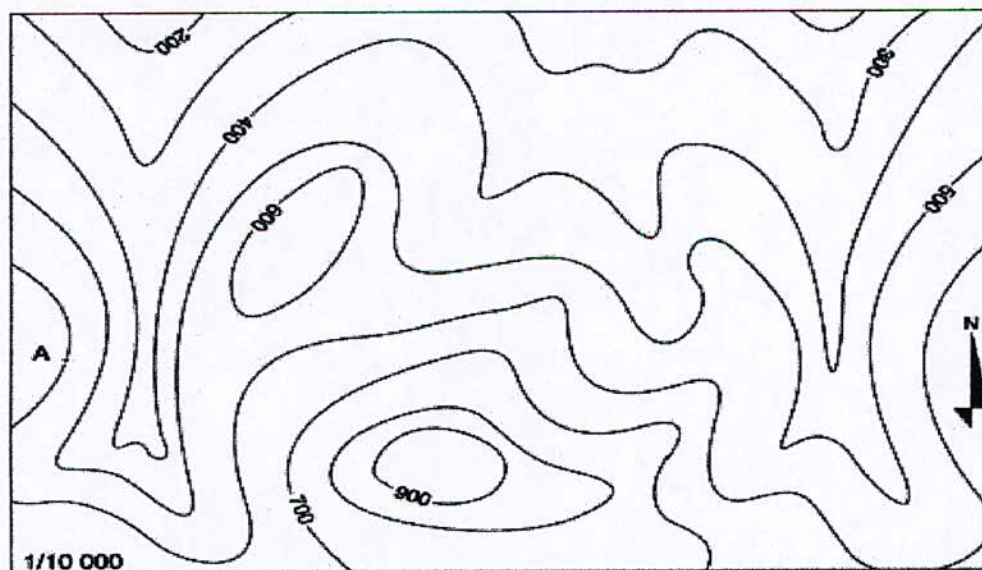
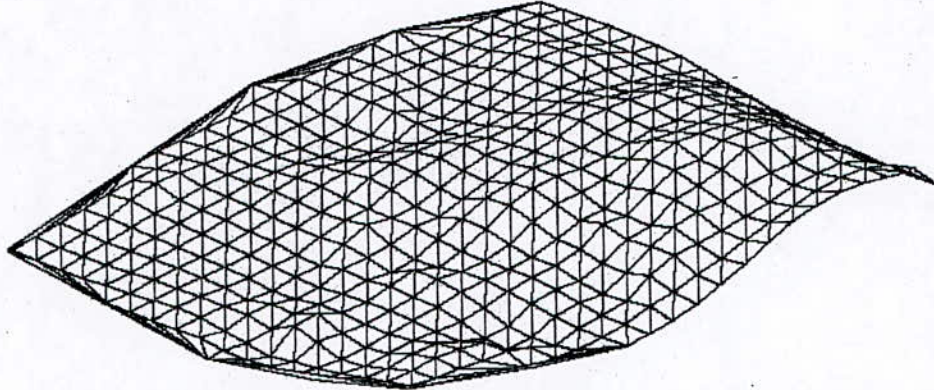


Figure 2.3 : surface représentée par des courbes isohypses (courbes d'égales valeurs)

b) Grille triangulée

c'est un modèle qui combine à la fois les avantages des deux modèles cités antérieurement (modèle TIN et Grille). Il est souvent utilisé lorsque on s'intéresse à la modélisation des surfaces comportant des arêtes vives que le modèle Grille ne respecte pas.



**Figure 2.4. : Surface représentée par une grille triangulée
(Triangulated GRID)**

2.9. Choix entre Raster /vecteur :

L'utilisateur aura la possibilité de choisir entre le M.N.T raster ou M.N.T vecteur. Son choix dépend essentiellement des données dont il dispose et des possibilités du logiciel utilisé. Tous les logiciels ne permettent pas d'utiliser les T.I.N, tandis que la plupart peuvent lire des images, et donc afficher le M.N.T dans ce mode.

Production du modèle numérique de terrain :

Deux étapes sont nécessaires pour créer un modèle numérique de terrain :

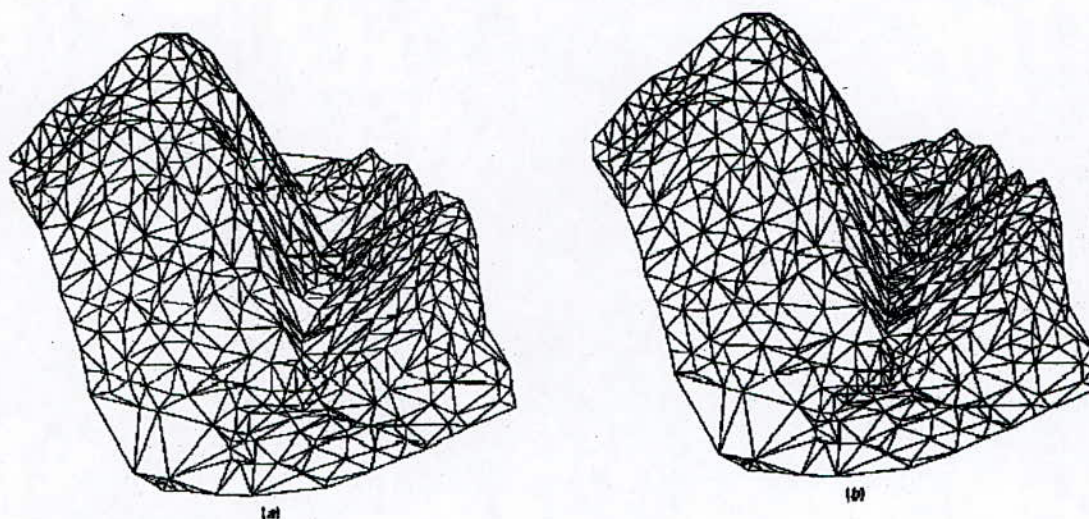
a. Obtention des coordonnées X, Y, Z :

- Nivellement par topométrie sur les lieux ;
- Numérisation à partir des courbes de niveau d'une carte
- Saisie des points ou des courbes de niveaux de terrain sur fond de plan scanné ;
- Mesures stéréoscopiques à partir d'images de satellite

b. Interpolation des coordonnées X, Y, Z.

Pour rendre le modèle plus réaliste et plus conforme à la réalité du terrain l'utilisateur doit inclure les lignes de crête et les thalwegs lors de la digitalisation. L'exemple (Figure.2.5)

D'un modèle numérique construit avec des facettes triangulaires montre bien les deux cas de figure.



DTM: (a) without breaklines, (b) with breaklines.

Figure 2.5. : MNT TIN avec et sans les lignes de crêtes et les thalwegs.

2.10. Informations dérivées

A partir du MNT, il est possible de créer un certain nombre de fichiers dérivés qui seront utilisés dans de nombreuses analyses de terrain. Les informations dérivées peuvent être scindées en deux parties à savoir :

1. Informations dérivées cartographiques

- ❖ **Pentes et orientations** : dérivées à partir du fichier d'altitude ;
- extraction de points singuliers* : il est souvent utile d'extraire les points singuliers d'un M.N.T. ceux ci peuvent être des cuvettes, des pitons¹, des lignes de crête ou de drainage ;
- ❖ **Cuvette** : si la valeur du point central est égale au minimum et que cette valeur est unique alors ce point central est bien une cuvette ;
- ❖ **Piton** : si la valeur du point central est égale au maximum et que cette valeur est unique alors ce point central est bien un piton ;
- ❖ **Ligne de crête** : les points de valeur minimale dans la fenêtre sont marqués par un 1. La ligne de crête est définie par l'ensemble des points non marqués à la fin du traitement ;
- ❖ **Ligne de drainage** : les points de valeur maximale dans la fenêtre sont marqués par un 1. La ligne de drainage est définie par l'ensemble des points non marqués à la fin du traitement.
- ❖ **Crates d'enseillement** ;

¹ : Pointe d'une montagne élevée

- ❖ Zones hypsométriques ;
- ❖ Courbes de niveau.

2. Autres informations dérivées

Ces informations peuvent être linéaire : exemple : profils en long de l'oued ; ou coupes de terrain. Elles aussi être complexes : exemple : vue en perspectives.

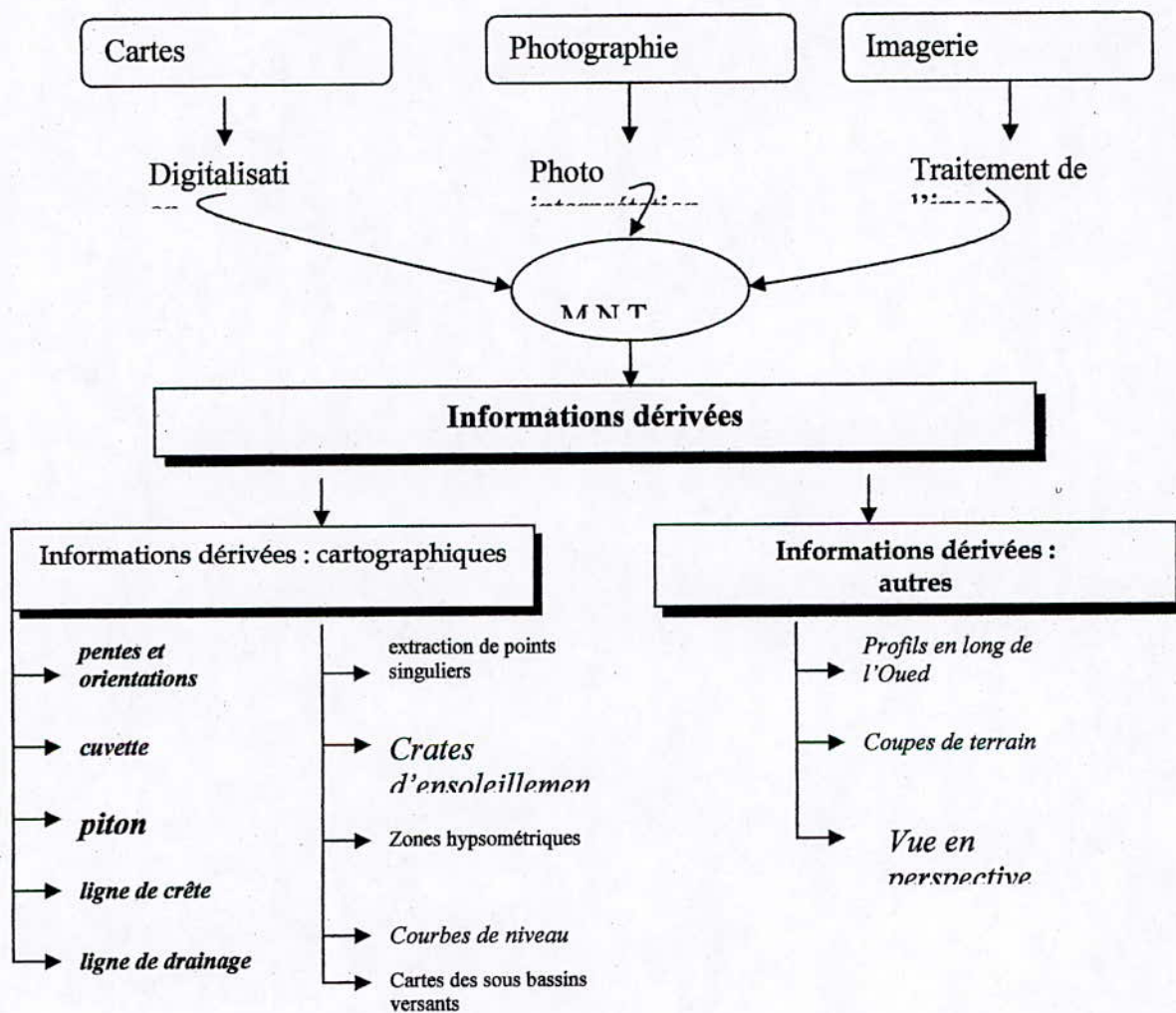


Figure 2.6.: les sources d'information d'un M.N.T.

2.11. Précision d'un M.N.T

La précision du modèle numérique de terrain, qui est impossible d'ailleurs à formaliser, est globalement évaluée en fonction de plusieurs paramètres en particulier :

- ❖ L'échelle de la carte topographique (courbes de niveaux) utilisée(s) ;
- ❖ Equidistance des courbes de niveau ;
- ❖ L'échelle de la résolution des images (ou photographies) utilisées ;
- ❖ La densité des points, réellement mesurés sur le terrain et la précision des levés,
- ❖ La répartition de ces points en fonction du caractère plus ou moins accidenté du terrain en particulier pour les (T.I.N).

PARTIE 3
ANALYSES ET INTERPRETATION.

1. Méthodologie

Notre travail consiste d'expliquer la relation éventuelle entre la ressource en eau souterraine et les données géologiques en utilisant la méthode de cartographie axée sur les SIG en exploitant et en gérant des données géographiques et descriptives existant dans notre zone d'étude puis faire une analyse quantitative et qualitative de ces données.

Pour ce travail nous avons suivie les étapes suivantes :

1.1. La récolte des données

La récolte des données s'effectue en premier lieu par une recherche bibliographique (ouvrages, thèses, mémoires,...), utilisation de cartes topographiques et thématiques de la région étudié relatives à notre but de recherche et servant à l'élaboration de notre base de données.

Ces documents collectés pour ce travail sont des données de type spatial (cartographiques) et descriptives (alphanumériques).

1.2. Matériel et logiciels

Le choix du matériel et des logiciels est conditionné par les besoins ressentis tout au long des précédentes étapes de notre étude (étape d'élaboration d'un SIG).

❖ Les logiciels

Les logiciels utilisées sont représentés dans la tableau suivant :

Logiciel	Version	Source	Fonction
Map Info	6.5	Map Info professionnel	SIG
Photoshop	6.0	Adobe photoshop	Retouche d'images, conversion de format.
Exel	1998	Microsoft	Saisie des données tabulaires, réalisation des opérations mathématiques.

Le Map Info est l'outil principale de gestion dans un SIG, il est constitué de plusieurs fonctions offrant des possibilités de manipulation et de traitement de données : Option de gestion des bases de données, utilisation des fichiers sous plusieurs formes (word, Exel, ...), affichage des données sous formes de graphiques, de cartes et de tableaux, etc.

❖ Le matériel

Le matériel utilisée pour notre travail se compose de :

- un micro ordinateur : intel MMX (TM), Pentium II processor , RAM 64.0 Mo, disque dur 4 Go.
- Scanner de format A₀.

- Imprimante hp deskjet 845c series.

1.3. Documents utilisés

Pour notre travail, nous nous sommes basé sur des données existantes sur des documents papiers (cartes topographiques, thématiques et carte d'occupation des terres), relatives à notre zone d'étude, ces cartes sont :

- Carte topographique de Tamanrasset (Fort Laperine) au 1/200.000^{ème} établie par l'IGN en 1969
- Carte géologique au 1/200000^{ème} de la wilaya de Tamanrasset établie par l'ONRGM en Juillet 2002 .

Afin qu'elles soient exploitable par l'outil informatique , ces données spatiales (documents papiers) doivent être d'abord convertis en fichiers numérique, intégrées à la base de données, reproduit puis conservées.

Cette conversion se fait selon trois méthodes de numérisation et de saisie : la scannérisation, la digitalisation et l'alphanumérisation.

1.4. La scannérisation

Appelée encore balayage électronique, permet la transformation des documents cartographiques en image numérique à l'aide d'un scanner (dans notre cas le scanner utilisé est de type A₀), puis leur stockage sous format TIFF (Tagged Image File Format- format de fichier d'images référencées). Le choix du type de format TIFF au autres formats n'est pas aléatoire vu que les cartes sont très volumineuses ceci est du a la resolution du scannage :

- Pour la carte topographique la résolution est de 400 dpi (dot per inch)
- Pour la carte géologique la resolution est de 300 dpi (dot per inch)

Le format résultant de cette opération est appelé format « Raster ».

Avant de passer à l'étape suivante qui est la digitalisation, on procède à l'entrée des données dans le Map Info professionnel comme suit :

- Choix de la projection adéquate au type de carte utilisée, dans notre travail, la projection choisie c'est la projection LAMBERT Sud Algérie ancien pour la carte datant d'avant 1960 et Sud Algérie récent après 1960.
- Calage des cartes : se fait avec quatre points de calage, dans notre cas, les erreurs de pixel sont comprises entre (1 et 3) ce qui est dans les normes.

1.5. La digitalisation

C'est l'opération qui permet la récupération de la géométrie des objets d'une carte à l'aide de la souris. Chaque point, ligne et surface est représenté par les coordonnées X et Y : une coordonnée seul représente un point, un série de coordonnées constituent une ligne et plusieurs lignes composent le contour de la surface, dans ce cas on parle du format « Vecteur »

1.6. L'alphanumérisation

Il s'agit de la saisie des données descriptives à l'aide du clavier dans la base de données sous forme de tableau, les colonnes sont appelées champs, et les lignes sont des enregistrements.

1.7. Organisation de la base des données

Après scannerisation, calage, et en parallèle à la digitalisation des différentes cartes et cartons on a procédé a l'organisation des bases de données

Nos bases de données sont sous forme de tables attributaires. Ces attributs seront codés.

Ces attributs contiennent des informations spatiales (surface, périmètre, code géologique etc...) qui formes des champs

Une fois les cartes scanner on passe à la phase de digitalisation :

Avant tous travail de digitalisation a partir de plusieurs cartes il est primordial et indispensable d'avoir les différentes cartes a la même échelle, pour que les informations recueillis des différentes cartes soient cohérentes.

La phase de digitalisation est la phase la plus longue et la plus fatigante car son but est d'essayer de représenter tous les détailles qui se trouvent sur les cartes pour une meilleur interprétation pour plus tard.

Cette représentation se traduit dans le langage par la création des couches thématiques,

Dans notre études on a crée plusieurs couches thématiques en parallèle on crée une base de données selon le type (numérique, caractère, flottant, etc ...):

- Couche thématique représentant le réseau hydrographique
- Couche thématique représentant les forages qui se situent dans la région de Tamanrasset ;
- Couche thématique représentant les fractures ;

- Couche thématique représentant les différentes formations géologiques ;
- Couche thématique représentant une zone d'étude.

La zone d'études est tracée selon la localisation des différents forages de la région de Tamanrasset.

D'après la recherche bibliographique ainsi que nos constatation on relève les conclusions suivantes :

Les possibilités de présence de l'eau sont fort possibles dans les formations suivantes :

- ❖ Dans les formation quaternaire puisque
- ❖ Dans les formations volcanique
- ❖ Dans les formations de basalte

La liste des forages productifs dans la région de Tamanrasset ont été obtenu de la part de DHW de Tamanrasset (voir annexe).on a oublier de le mentionner mais les forages N°15, 16, 17 sont des forages effectuées dans la nappe de fissuration c'est pour ça qu'on leurs a attribuer une autre forme de signe pour les distinguer.

Lors de la digitalisation il est préférable de remplir la base de données en parallèle.

Après avoir placé les différents forages suivant leurs coordonnées, on crée une couche de données qui s'appelle : Forages .le but de faire une couche de données modifiable a pour intérêt que plus tard si il y aura d'autre forage dans la région ou l'un des forages existants aura une donnée supplémentaire on pourra l'introduire facilement et exploiter l'information.

La figure 1 représente la zone d'étude qu'on a sélectionnée pour notre travail + la carte topographique de la région de Tamanrasset.

La figure 2 représente le réseau hydrographique + la carte topographique de la région de Tamanrasset.

2. Les différentes combinaisons de couche.

2.1. Forages +hydrographie (fig 4)

La superposition du réseau hydrographique et de la carte des forages on remarque que les forages effectués dans la région de Tamanrasset sont placés dans des zones où le réseau hydrographique est dense.

2.2. Couche des forages + couche du réseau hydrographique + couche de fissuration (fig 5)

Effectivement on remarque que les trois forages effectués dans le milieu fissuré (en triangle bleu) sont bien représentés une fois de plus, mais surtout le plus frappant c'est que les différentes fissures ainsi que le réseau hydrographique sont presque parallèles ce qui favorise l'infiltration de l'eau lors des crues à travers les failles.

2.3. Couche des forages + couche du réseau hydrographique + couche de fissuration + couche géologique (fig 6).

On remarque que la zone de concentration des forages la formation de la géologie est Quaternaire plus précisément des dépôts de pénéplaines (regs).

REMARQUE

On peut faire combiner autant qu'on veut de couche a chaque fois il faut bien savoir comment lier l'image obtenue a la réalité et au lois de la physique.

CONCLUSION

Au terme de notre travail et selon nos observation on peut tirer a partir des differentes données que nous avons DEUX (2) site susceptible de présence de l'eau souterraine les parcelle sont entourées de rouge pour les marquée qui sont les suivant :

SITE N°1 : le choix de se site est du a :

- La géologie qui se compose de granite intensifs sub-alkalin à grains moyens à gros ainsi que de de dépôts de pénéplaines ;(page 34,35)
- La présence de la fissuration et du réseau hydrographique qui sont presque parallèles se qui favorise l'infiltration des eaux.

SITE N°2 : le choix a été porte sur se site parce que :

- Présence de formation quaternaire (dépôt éolien, et de pénéplaines) ainsi que du Granitoïde précoce et du basalte ;
- La présence de la fissuration et du réseau hydrographique qui sont presque parallèles se qui favorise l'infiltration des eaux.

3. CONCLUSION GENERALE

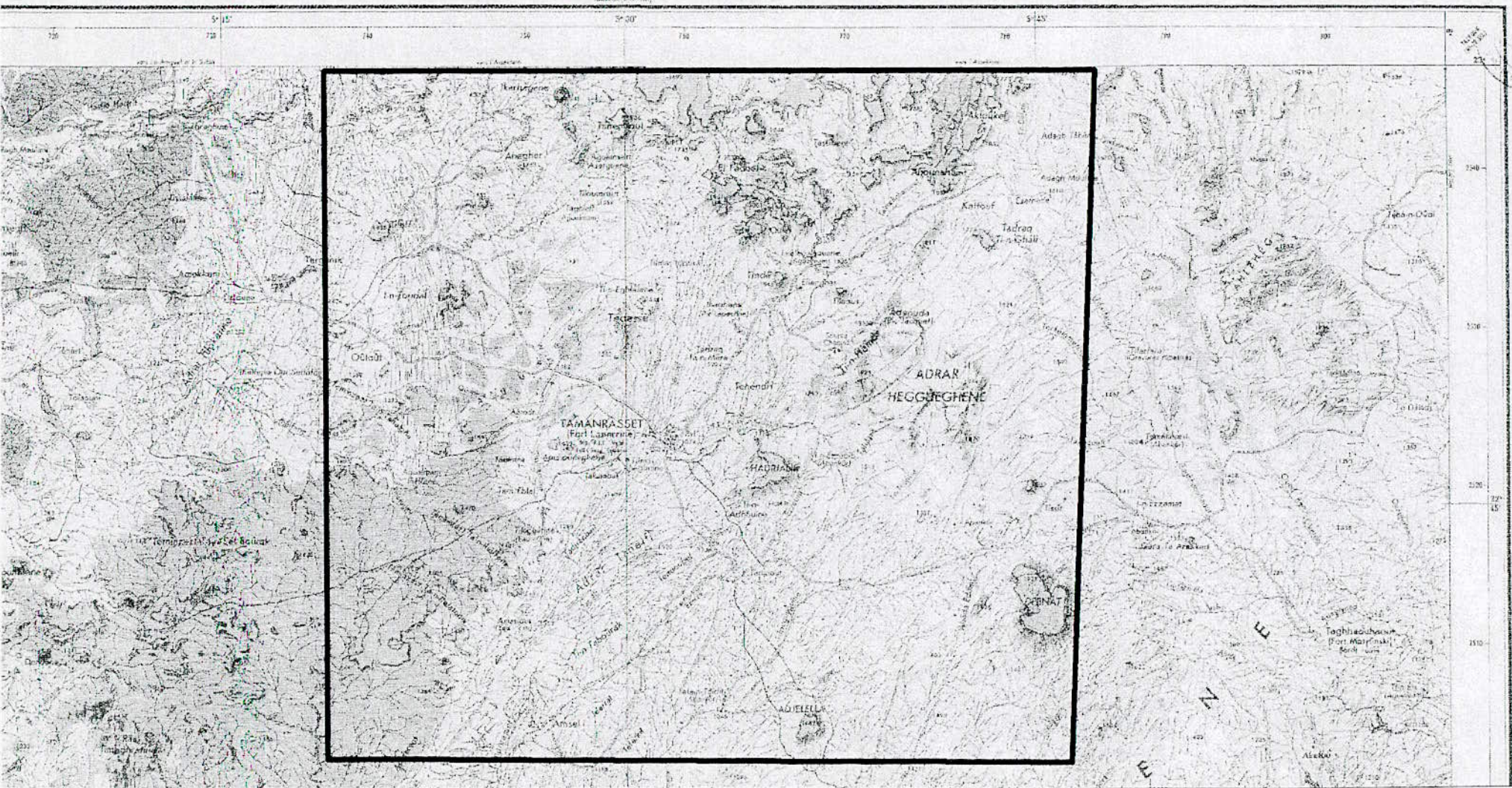
Tout au long de ce travail, nous avons tenté une nouvelle approche, afin de trouver une nouvelle méthode de recherche de l'eau souterraine au niveau des régions arides ou semi-arides .

Après avoir bien défini les outils de travail ; le système d'information géographique, le but de notre travail n'est pas de dire que les SIG, sont des outils fiable a 100% et qu'il puissent replacer les méthodes classique de recherche des eaux souterraines, tel que les prospections géophysique.

Bien au contraire les SIG sont des outils de complémentarité avec les méthodes classiques, puisque a l'aide des SIG on essaye de limiter des zones de recherche de possibilité de présence de l'eau ensuite il faut consolidé les propositions par des sortie sur terrains avec une prospection géophysique ou autre.

Donc le rôle des SIG dans la recherche des eaux souterraine est le gains de temps dans la recherche puisque les site sont pré déterminés celui qui dit gain de temps dit gains d'argent.

L'idéal dans notre travail est de faire des sortie sur terrain pour vérifier les proposition faite sur les deux site de possibilité de présence de l'eau.



9183

FIG 1: Carte Topographique + Couche de la zone d'étude.



FIG2: Carte Topographique + Couche du réseau hydrographique.

forage	profondeur	debit	etat_actuel	type_de_nappe
1	13	1	Exploitable	
2	25	0,9	Exploitable	
3	25	2,5	Exploitable	
4	25	3	Exploitable	
5	23	1	Exploitable	
6	25	0,5	Exploitable	
7	25	0,2	Non exploitable, très faible débit	
8	13	0	Abandonner	
9	25	9	Exploitable	inferoflux
10	25	6	Exploitable	Inferoflux
11	27	7	Exploitable	Inferoflux
12	21,7	0,66	Non exploitable, très faible débit	
13	28	5,5	Exploitable	
14	22,7	2,2	Exploitable	
15	100	30	Exploitable	Fissuration
16	95	41	Exploitable	Fissuration
17	110	46	Exploitable	Fissuration

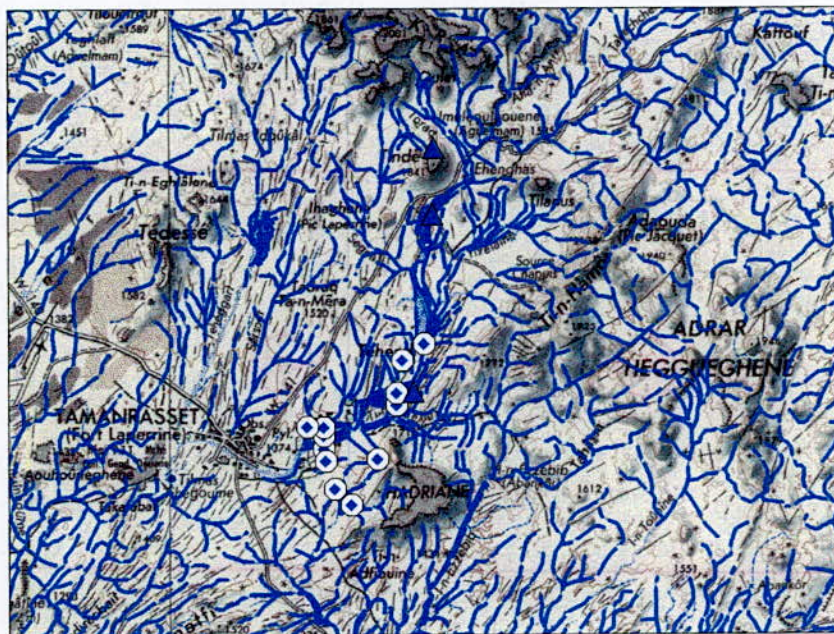


Fig 3 : Réseau hydrographique et le positionnement des différents forages ainsi que la base de données des forages.

Identifiant	Code	Appelation
21	Ga	roche plutonique acide
21	Ga	roche plutonique acide
21	Ga	roche plutonique acide
1	Qb	dépôts eoliens
0		

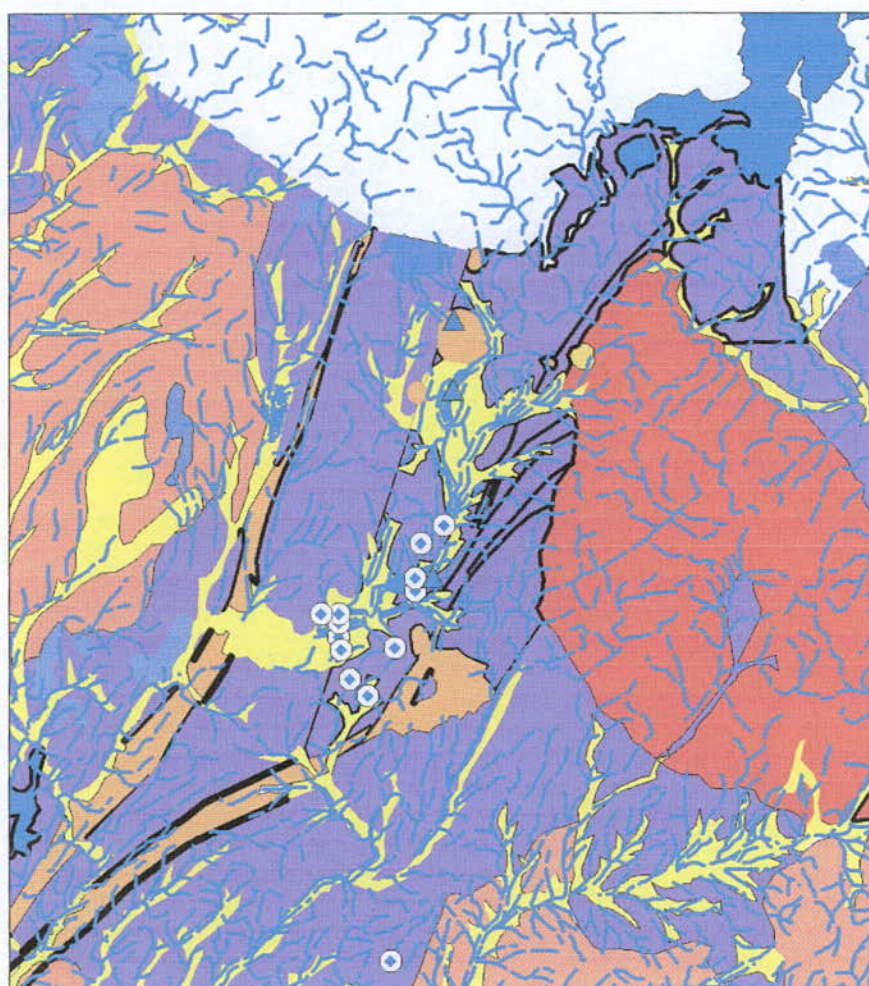


Fig 4 : Réseau hydrographique, une partie de la couche géologique, les différents forages ainsi qu'une partie de la base de données de la couche géologique.

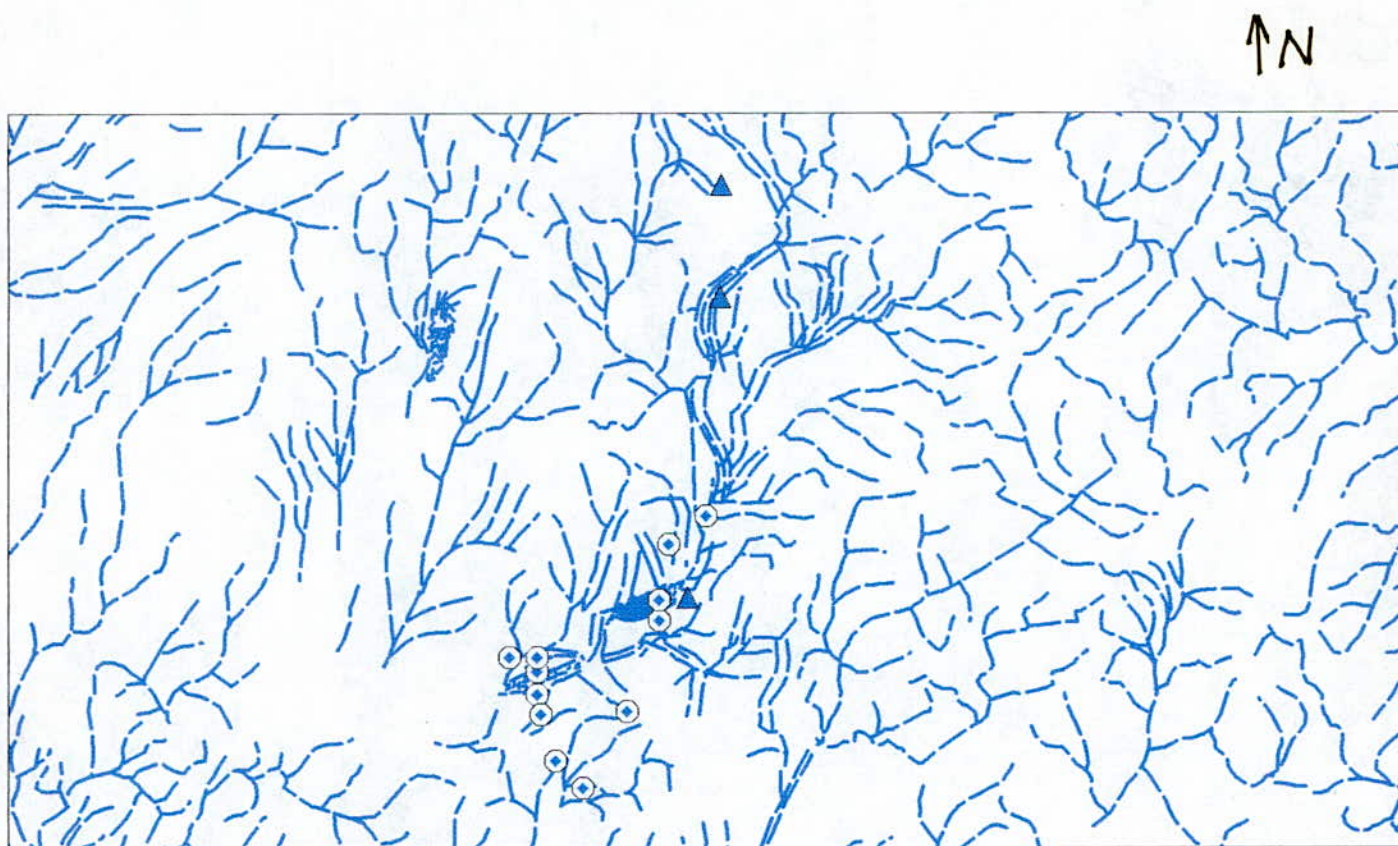
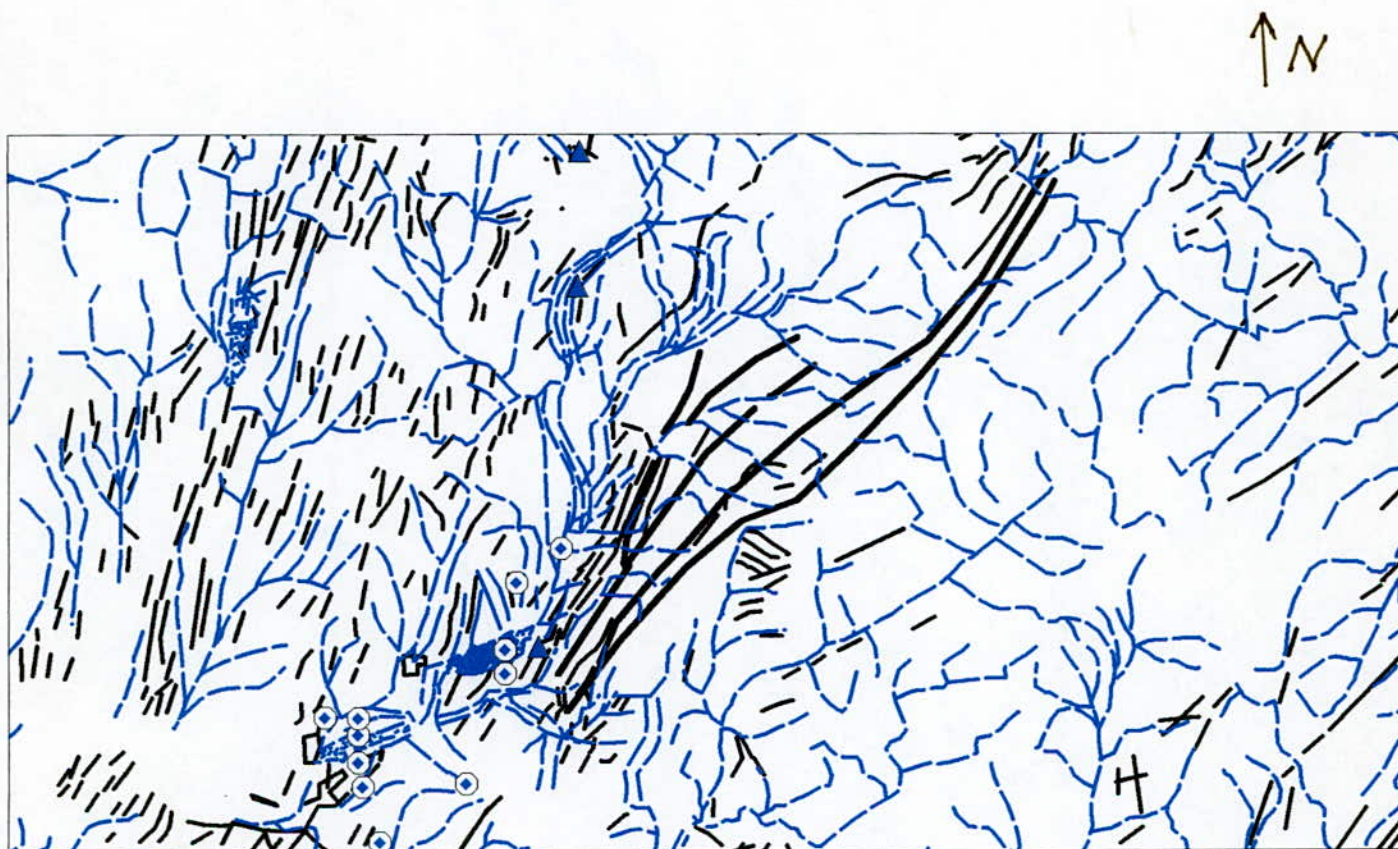


Fig. 5 : Réseau hydrographique et une carte thématique.



**Fig. 6 : couche de réseau hydrographique, une carte thématique,
couche de forages et une couche de fissuration.**

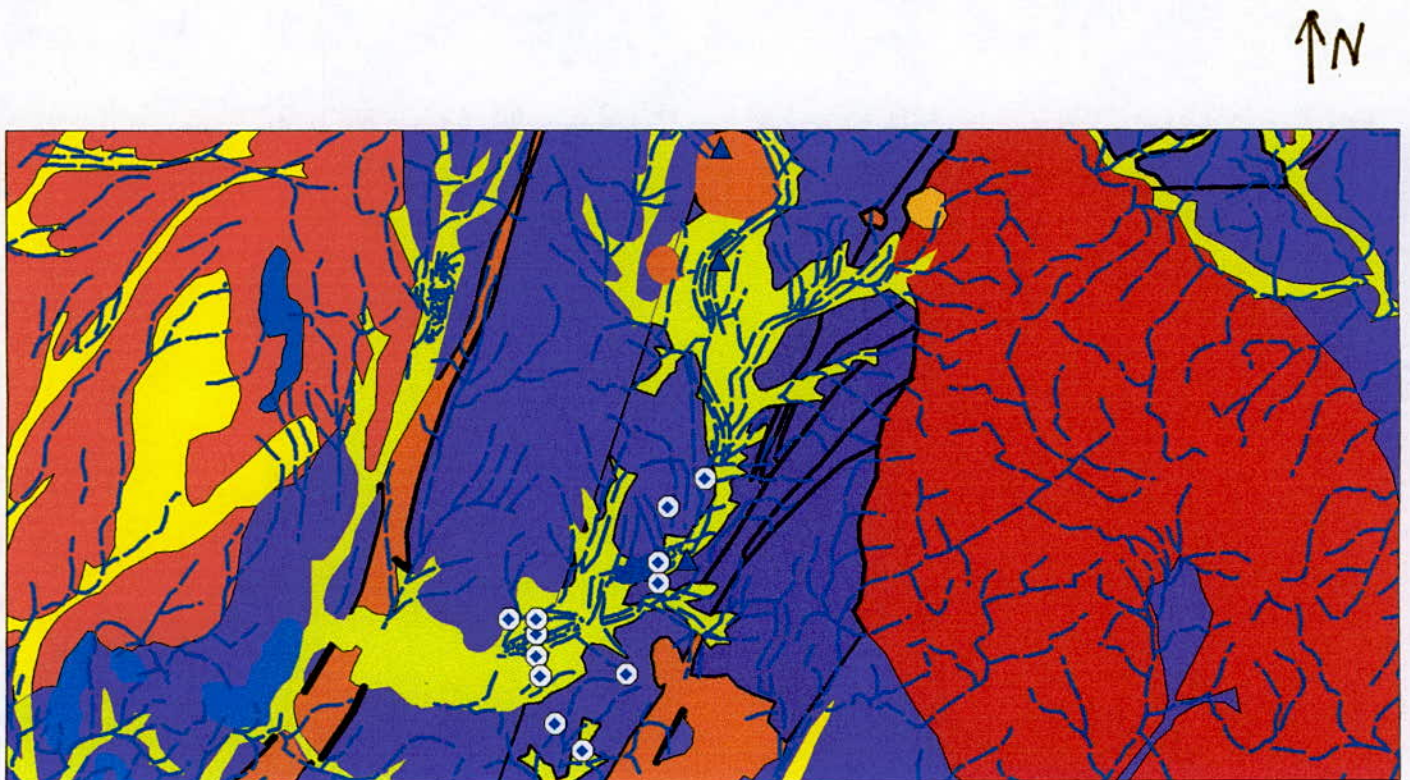
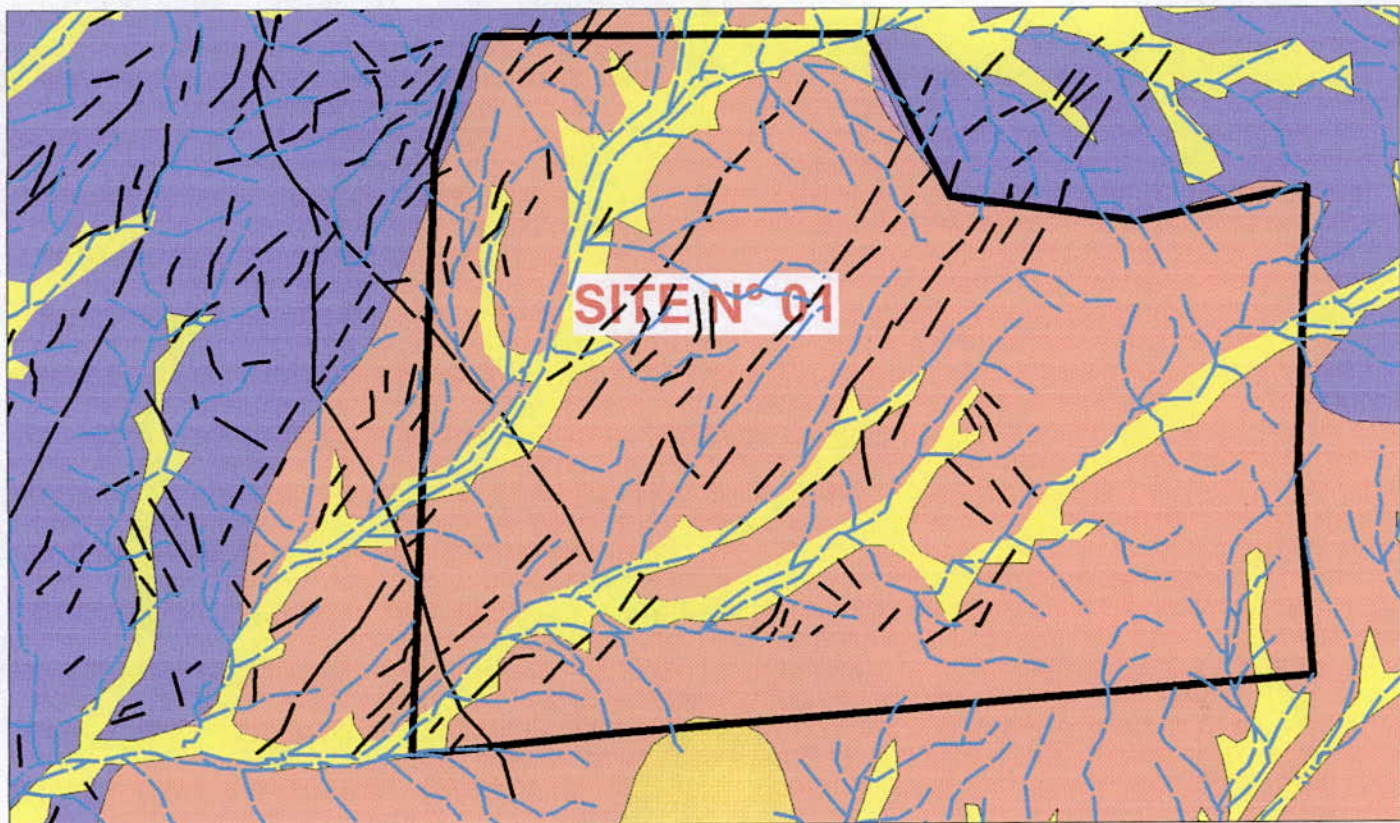
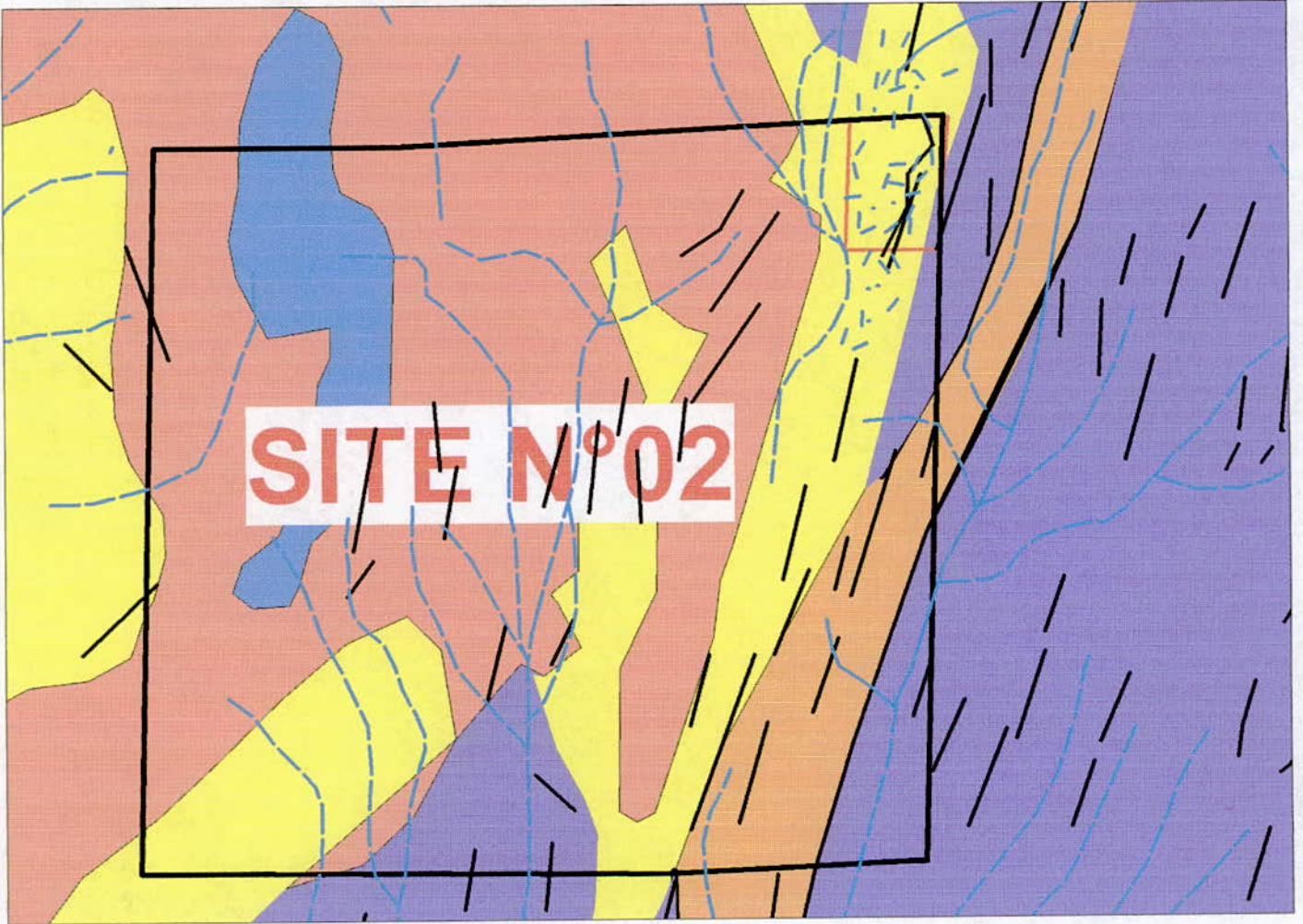


Fig. 7 : couche de réseau hydrographique, une couche thématique, couche de forages, une couche de fissuration et couche géologique.





SITE N°02

Bibliographie

- [1] revue internationale de géomatique, **Systèmes d'information environnementaux et d'aide à la décision «Méthodes et Antilles»**, European journal of GIS and spatial analyses, Volume 8 n° 3/1998, édition HERMES 1998.
- [2] AMOR Laaribi, **SIG et analyse multicritère**, édition HERMES, 2000.
- [3] Jean-paul Cheylan, Gip-RECLUS Montpellier, **Représentation de l'espace et du temps dans les SIG**.
- [4] BIOMAC François, **Diffusion, expériences, données, cartographie, méthodologie**, ESRI 98.
- [5] **Représentation de l'espace et du temps dans les SIG**, CASSINI Groupe Temps×espace.
- [6] LARDON Sylvie, CLARAMUT Christophe, **Revue internationale de géomatique**.
- [7] BRGM, N°195 ; **l'eau souterraine un patrimoine à gérer en commun**.(colloque)
- [8] MARGAT Jean, **Les eaux souterraines dans le bassin méditerranéen, ressources et**
- [9] N.COUSCOV ; **Alimentation en eau de Tamanrasset, utilisation de l'inferoflux de l'Oued Oufoul** ; rapport inédit S.E.S
- [10] LALLEMAND Andrée, BARRES, **Périmètre de protection des captages d'eau souterraine destinée à la consommation humaines**, édition BRGN
- [11] CASTANI Gilbert ; **Hydrogéologie, principes et méthodes** ; édition DUNOD.
- [12] BEN MALEK Mohamed, KACIMI Malek ; **Étude hydrogéologique de l'inferoflux de la nappe alluviale (amont) de l'oued Oufoul, AHAGGAR centrale –**

W.Tamanrasset, USTHB

- [13] **Rapport de synthèse**, groupe mixte SONATRACH-IDROTECNECO d'étude hydrogéologique du HOGGAR.
- [14] **Inventaire et prospective de ressources minérales au HAGGAR**, ONRGM ex SONATRACH.
- [15] **rapport sur les résultats des travaux de recherche et de prospection hydrogéologique** ; exécutés dans la région de Tamanrasset en 1973-1975 SONAREM
- [16] **Rapport final : étude géographique de l'oued Tamanrasset et ses extensions**, le centre de recherche en astronomie astrophysique et géophysique (CRAAG), octobre 2001.
- [17] SAIGHI Omar, **Possibilité aquifère au HOGGAR central**, thèse doctorat, géologie appliquée, USTHB.
- [18] G.CASTANY, J.MARGAT. **Dictionnaire français d'hydrogéologie** ; BRGM ,1997.
- [19] FOUCAULT, J.F. RAOULT ; **Dictionnaire de géologie** ; MASSON 2^{ieme} trimestre 1980.
- [20] K.BODY ; **Études pluviométrique de la ville de Tamanrasset** ; étude 127 ; date 18/03/1980.
- [21] **Note sur le pluviomètre de la ville de Tamanrasset** ; ANRH.
- [22] J.DUBIEF ; **Essai sur l'hydrologie superficielle au Sahara** ; 1959.
- [23] le HOGGAR : **État des connaissance hydrogéologique** ; ANRH. septembre 1983.
- [24] F.BOUCAMA,D.KHIATI ,K.HARBILI. Communication «**l'utilisation des SIG pour l'étude des ressources en eaux souterraines**» ; ANRH, 1999.

- [25] R. BOUZAKARIA ; **Concepts de base des SIG** ; ANRH , 1994.
- [26] AXE Françoise ; **Les images SPOT, une source d'information sur l'eau** ; SPOTimages, France.
- [27] notice explicative de la carte hydrogéologique du HOGGAR et du TASSILI ; 1/1000000.
- [28] A. LARBES, M. SAMI ; **Étude hydrogéologique et modélisation de la nappe de l'oued d'IN AMGUEL (Tamanrasset)** , 1990.
- [29] CORNET ; **Amélioration de l'alimentation en eau de Tamanrasset; plan 1/50000** ; 1949.
- [30] A. CODUR ; **Notice de morphologie terrestre** ; paris, 1956.
- [31] M. DERRUAU ; **Les formes de relief terrestre, notion des géomorphologie** ; 1956, édition MASSON.
- [32] PORNOU Henri ; **Les SIG, mise en œuvre et application** ; 1992, édition HERMES.
- [33] <http://plante.scg.ulaval.ca> .
- [34] <http://www.fao.org/sd/frdirect/gis/EIgis000.htm>
- [35] <http://www.certu.fr/sitcert/geomat/minisi01/signatur/dossier8/dossier8.htm>
- [36] http://www.geocomputation.org/1999/042/gc_042.htm
- [37] <http://www.cgm.polymtl.ca/civ1101/relief%20terrain.pdf>

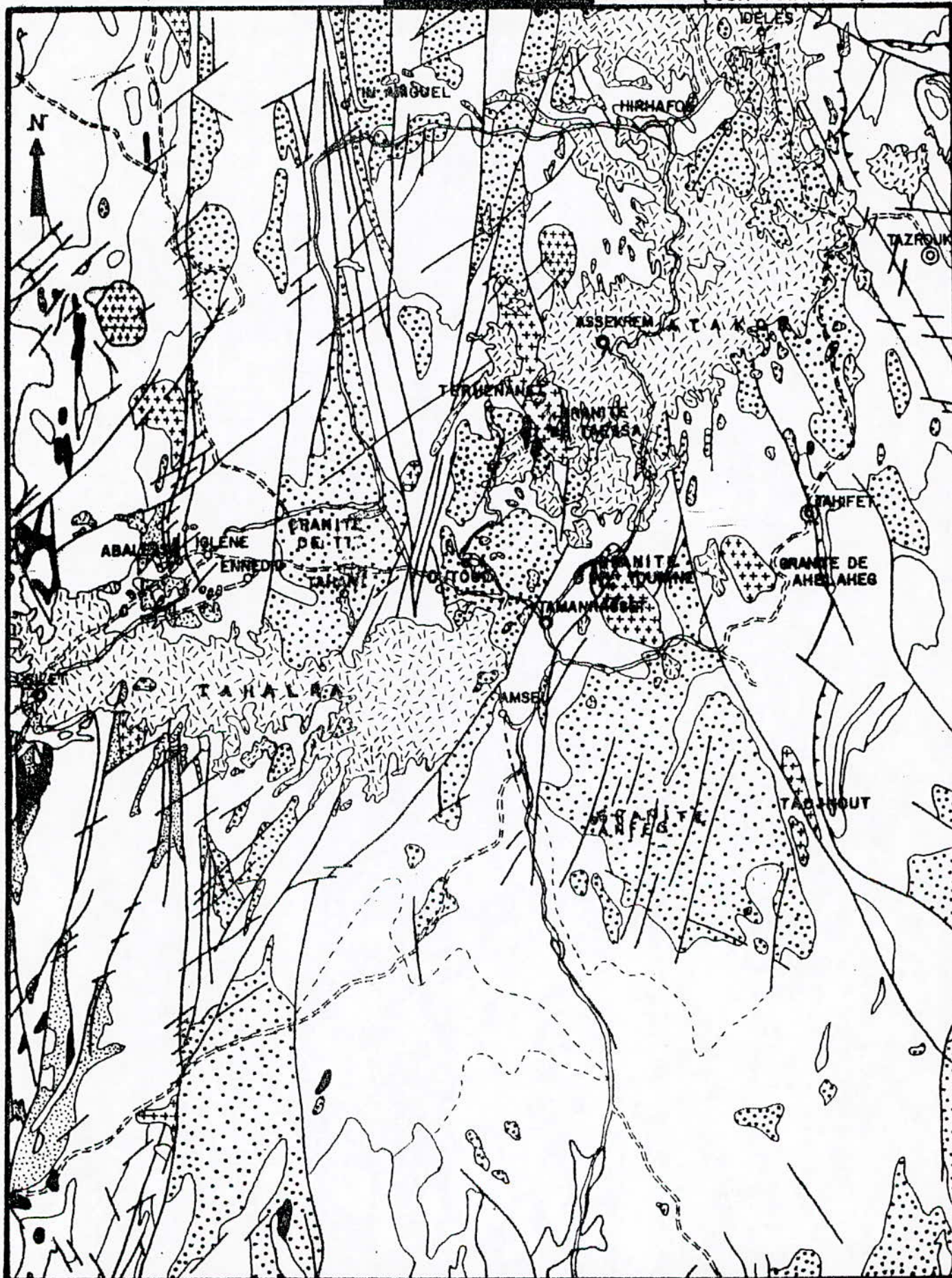
ANNEXE

Caractéristiques des forages dans la daïra de Tamanrasset

N° D'ordre	N° forage	Année réalisation	Localisation	coordonnées			Profondeur	Q (l/s)	Δ (m)	niveau		Capacité spécifique m ³ /l/m
				Long X	Latitude Y	Hauteur Z				S	D	
1	F1	1977/78	Tamanrasset aval	5° 34' 7"	22° 41' 2"	1382.78	13	1.0	4.08	9.86	13.84	0.88
2	F2	1977/78	Tamanrasset aval	5° 33' 3"	22° 47' 9"	1382.45	25	0.9	5.33	10.27	15.6	0.54
3	F3	1977/78	Tamanrasset aval	5° 33' 3"	22° 47' 25"	1384.96	25	2.5	9.17	9.71	18.88	0.98
4	F4	1977/78	Tamanrasset aval	5° 33' 3"	22° 47' 35"	1384.5	25	3	4.2	9.78	13.98	2.75
5	F5	1977/78	Tamanrasset aval	5° 33' 6"	22° 46' 55"	1384.68	23	1	7.2	10.13	17.33	0.5
6	F6	1977/78	Tamanrasset aval	5° 33' 17"	22° 46' 22"	1390.06	25	0.5	12.15	12.85	25	0.148
7	F7	1977/78		5° 33' 38"	22° 46' 23"	1390.84	25	0.2	8.76	11.24	20	0.08

Forage de Tamanrasset.

8	F8	1977/78	Tamanrasset amont	5° 34' 35"	22° 48' 15"	1408.26	13					
9	F9	1977/78	Tamanrasset amont	5° 34' 35"	22° 48' 01"	1406.26	25	9	4.62	9.6	14.22	7.01
10	F10	1977/78	Tamanrasset amont	5° 34' 42"	22° 48' 54"	1416.90	25	6	4.06	12.24	16.30	5.3
11	F11	1977/78	Tamanrasset amont	5° 35' 10"	22° 49' 14"	1420.71	27	7	21.56	13.77	16.33	9.84
12	F12	1977/78	Tamanrasset aval	5° 32' 35"	22° 46' 31"	1382.2	21.7	0.66	14.05	7.65		0.17
13	F13	1969/70	Tamanrasset aval	5° 32' 42"	22° 47' 35"	1384.65	28	5.5	18.35	7.65	26	1.09
14	F14	1969/70	Tamanrasset aval	5° 33' 71"	22° 46' 57"	1386.82	22.7	2.2	13.59	8.41	22	0.509
15	F15	1999		5° 34' 56"	22° 48' 17"	1353	100	30				
16	F16	1999		5° 35' 20"	22° 51' 46"		95					
17	F17	1999		5° 35' 21"	22° 51' 24"		110					



Pré-terozoïque Terminal 800-650 M.A.		Pré-terozoïque Sup. 1000-800 M.A.		Pré-terozoïque Moyen 1800-1000 M.A.		Pré-terozoïque	
	Basalte .		Sy3 Syénite.		Pr2 Formation de plate forme facies amphibolite .		Pr Gneiss migmati
	Granite		B3 Batholites hypovolcaniques, granodiorite et diorite quart. zitique .				
	Taourit.		D3 Diorite .				
	Granite s./syn-orogénique plus ou moins concordants (650-600 M. A.).		D3 Diorite .				
	B4 Batholite hypovolcaniques, granite calco alcalin, granodiorite		S3 Serpentine .				
	Pr4 Form. volc.-détrit. greywackes volc. et conglomérats.						

LEGENDE

I- FORMATIONS QUATERNAIRES:

- | | |
|----|-----------------------------------------|
| Q3 | Dépôts alluvionnaires. |
| Q2 | Dépôts éoliens (ergs, dunes, barkhanes) |
| Q1 | Dépôts de pénéplaines (regs). |

II-FORMATIONS VOLCANIQUES CENOZOIQUES-QUATERNAIRES

1- Volcanisme récent (Tahalra)

Apport des SIG R
des ressources en eau.



Trachytes (T) et phonolites (F).

Annexe



Cônes de basaltes et pyroclastites associées.



Coulées et épanchements récents de basaltes.

2 - Volcanisme Ancien (Atakor).



Trachytes (T) et phonolites (F)



Cônes de basaltes et pyroclastites associées.



Coulées et larges épanchements anciens de basaltes

III- FORMATIONS JEIO CAMBRIENNES:

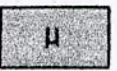


Molasses: Rhyolites blanches surmontées d'arkoses, grès ferrugineux, conglomérats polygéniques. sub-arrondis.

IV- FORMATIONS PROTEROZOIQUES.

A- Panafricaines.

1- Roches Métamorphiques.



Mylonites et phyllonites.



Migmatites.

2-Roches plutoniques.

21-Roches plutoniques acides



Granites intrusifs post- tectoniques de type Taourirt, sub-alcalins à biotite à grains moyens à gros (Ahelheg, In Tounine...).



Granites tardi à post- tectoniques, Calco- alcalins à biotite à grains moyens à gros: Massifs circonscrits et petites coupôles.





Granites syn à tardi -tectoniques : Granites Calco- alcalins porphyroïdes à gros grains à biotite. Type Tadjmirt, Tiferkit.




Granitoides précoces pré à syn- tectoniques migmatitiques de type Anfeg, Granite et granodiorite porphyroïdes à biotite et / ou à amphibole.


22- Roches basiques associées.

 Gabbro- pyroxénites et Gabbros.

 Diorites et Gabbro- diorites.


B- Anté- panafricaines (Eburnéennes).

 Ensemble gneissique supérieur: Paragneiss,
leptinites avec abondance de méta- sédiments.
(Equivalent de la série de l' Aleksod)

 Ensemble gnéissique inférieur : à dominance
d' orthogneiss et à rares méta- sédiments.
(Equivalent de la série de l'Arechchoum)

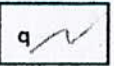
V - FORMATIONS FILONIENNES

 Filons de quartz.

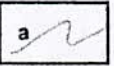
 Dykes acides.


 Dykes basiques

VI -HORIZONS REPERES.

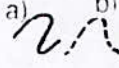

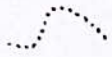
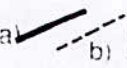



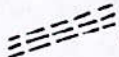
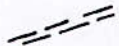





 Quartzites.

 Marbres.

 Amphibolites.

 Roches ultrabasiques.

VII-SIGNES CONVENTIONNELS

- a)  b)  Limites géologiques a) Observées.
b) Supposées.
-  Limites de faciés.
- a)  b)  Failles régionales: a) Observées.
b) Supposées.
- a)  b)  Autres failles. a) Observées.
b) Supposées.
-  Zone de mylonites.
-  Zone de schistosité.
-  Zone de foliation des granites .
-  Contact de nappes ou chevauchement
-  Discordance
- 40  Pendage de la foliation et sa valeur.
-  Allure des structures plissées.

VIII- INDICES ET GITES DES MINERAUX UTILES

- | | | | |
|------|-------------------|------|--------------------|
| o | Indice minéralisé | o W | Wolfram |
| O | Gisement | c Bi | Bismuth |
| o Cu | Cuivre | o Nb | Niobium |
| o Pb | Plomb | o Zr | Zirconium |
| o Zn | Zinc | ▲ | Sites historiques |
| o Sn | Etain | ⊙ | Gravures rupéstrés |

Schéma structural

Echelle 1/ 1000 .000

