



MEMOIRE

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

FILIERE : GEOLOGIE

Option : Hydrogéologie

Par : Mounia ABIDALLAH

Thème :

**Etude hydrogéologique des karsts de la région du Djurdjura :
Utilisation de SIG, télédétection et modélisation.**

Soutenu publiquement le 21/09/2023 devant le Jury composé de :

M. AMROUCHE Farid	M.A.C.A à l'UMMTO	Président.
M. BELAROUUI Abdelhakim	M.C.B à l'USTHB	Promoteur.
M. LOUNIS Rachid	M.A.C.A à l'UMMTO	Co-promoteur.
M. DROUCHE Abdelmadjid	M.C.B à l'UMMTO	Examineur.

REMERCIEMENTS

Je remercie vivement Mon promoteur Monsieur BELAROUI Abdelhakim, sans qui ce mémoire n'aurait pas vu jour. Je suis profondément reconnaissante d'avoir eu la chance de travailler sous sa direction. Ses compétences, son expérience et son dévouement à l'excellence académique ont été une source constante d'inspiration. Sa disponibilité pour répondre à tous mes questionnements me faisant part de ses conseils a été d'une valeur inestimable.

Je tiens également à remercier Monsieur AMROUCHE Farid d'avoir accepté de présider le jury et d'avoir toujours été de bon conseil à mon égard.

Sans oublier mon Co-promoteur Monsieur LOUNIS Rachid qui, grâce à ses années d'expérience et ses nombreuses études sur le Djurdjura m'a été d'une grande aide.

Je remercié aussi Monsieur DROUCHE Abdelmadjid., membre du jury, pour avoir consacré du temps à l'examen de mon travail.

Mes remerciements les plus sincères vont à Monsieur KARDACHE Remdane qui a toujours été bienveillant et prêts à aider tous ses étudiants.

Ma mère et mes sœurs mérite une reconnaissance spéciale. Leur soutien, encouragement et patience ont été les piliers de mon parcours académique.

Mes amis, ma deuxième famille. Katia, Kiki, El haddi, Pitou, Rahim, Soheib, Lyes et zinou sans qui ses 5 ans d'étude n'auraient jamais été les mêmes. Merci !

Merci également Lydia YACINE, ma meilleure amie qui, se trouvant à des milliers de kilomètres, a toujours su avoir les bons mots et être d'une grande aide à l'écriture de mon mémoire.

Merci à ASKLOU Fouad (Zinou) d'avoir toujours été là et de m'avoir encouragé à toujours bien faire et accompagner durant ces années de spécialité.

Je remercie mon amie Nina LIBAL qui n'a pas hésité à prendre l'avion pour venir assister à ma soutenance et de m'avoir toujours encouragé et soutenu depuis le début.

Je n'oublie pas de témoigner ma reconnaissance à mes enseignants du département des Sciences Géologiques à l'UMMTO, qui m'ont transmis leurs connaissances et leur expérience tout au long de ma formation. Ainsi que tous les enseignants avec qui je suis sortie en stage, Monsieur HAMIS, Monsieur BRAHMI, Monsieur ACHOUI, Monsieur KARDACHE, Monsieur DROUCHE, Monsieur AMROUCHE, Monsieur ZEGHOUANE et sans oublier Monsieur AHMED ZAID et Monsieur TADJ.

Merci à Monsieur Malek ABDESSELAM et Monsieur Chabane AIGOUN pour les précieuses sorties sur terrains durant tout notre cursus et des conseils d'années d'expérience qui ont toujours partagé avec nous sans la moindre hésitation.

DEDICACES

Je dédie ce travail avant tout à ma famille

A la mémoire de mon père, mon idole.

*L'homme qui a fait de moi la personne que je
suis aujourd'hui et sans qui je ne serai jamais
arrivé là où je suis.*

*A ma très chère mère, qui a œuvré pour ma
réussite, par son amour, sa patience et son
soutien.*

A mes chères sœurs, mes nièces et neveux.

A mes chats mon bonheur quotidien.

Résumé

Ce mémoire propose une réalisation du potentiel hydrique dans la région du Djurdjura en Algérie, en utilisant la méthodologie de l'Analyse Hiérarchique de Procédé (AHP). La région du Djurdjura est caractérisée par sa topographie montagneuse et complexe, abritant des ressources en eau cruciales pour l'agriculture, l'approvisionnement en eau potable et la biodiversité locale.

La première étape de cette étude consiste à synthétiser une étude géologique approfondie et une description des karsts présents grâce aux travaux antérieurs dans la région.

La deuxième étape se base sur une définition d'une hiérarchie des éléments pertinents liés au potentiel hydrique, notamment la lithologie, la fracturation, la pente, le drainage, l'exposition des versants, la pédologie, la courbure ainsi que la pluviométrie puis l'attribution des poids relatifs pour refléter leur importance est nécessaire.

Les conclusions ici peuvent servir de base solide pour les décideurs, les gestionnaires de l'eau et les chercheurs intéressés par la région du Djurdjura et ses enjeux liés à l'eau.

Ce travail de recherche représente un effort significatif pour mieux comprendre et optimiser l'utilisation des ressources en eau dans une région montagneuse unique et met en évidence l'importance de l'approche de l'AHP pour la gestion durable de l'eau dans des environnements similaires.

Mots clés : Djurdjura, AHP, Karsts, Hydrogéologie, Eau Souterraine.

Abstract

This work proposes an achievement of the water potential in the Djurdjura region of Algeria, using the Hierarchical Process Analysis (HPA) methodology. The Djurdjura region is characterized by its complex mountain topography and is home to water resources crucial to agriculture, drinking water supply and local biodiversity.

The first step of this study consists of synthesizing an in-depth geological study and a description of the karsts present thanks to previous work in the region.

The second step is based on a definition of a hierarchy of relevant elements linked to water potential, in particular lithology, fracturing, slope, drainage, slope exposure, pedology, curvature as well as rainfall then Assignment of relative weights to reflect their importance is necessary

The conclusions and recommendations presented here can serve as a solid basis for decision-makers, water managers and researchers interested in the Djurdjura region and its water-related issues.

The conclusions presented here can serve as a sound basis for decision-makers, water managers and researchers interested in the Djurdjura region and its water-related issues.

This research work represents a significant effort to better understand and optimize the use of water resources in a unique mountain region, and highlights the importance of the AHP approach to sustainable water management in similar environments.

Key words: Djurdjura, AHP, Karst, Hydrogeology, Groundwater.

SOMMAIRE

REMERCIEMENTS	i
DEDICACES.....	ii
Résumé	iii
Abstract.....	iv
Introduction Générale.....	1
Chapitre 1 : Généralités sur les karsts et les aquifères karstiques	5
1. Introduction	6
2. Les études antérieures.....	6
3. Généralités.....	8
Karst :	8
Aquifère karstique :	8
Source karstique :	8
Exurgences :	9
Résurgence :	9
Source vaclusienne :	9
4. Les diverses approches des karsts.....	10
5. Structure et fonctionnement des aquifères karstiques	11
6. Classification des aquifères karstiques	11
7. L'impluvium non-karstique.....	11
8. Mise en place d'un paysage karstique	12
La karstification.....	13
La suffosion	17
9. Zonation des karsts	17
L'épikarst et la zone d'infiltration.....	18
La zone saturée ou le karst noyé.....	20
Conclusion.....	21
Chapitre 2 : Présentation de la zone d'étude	24
1. Introduction	25
2. Contexte géographique.....	25
3. Géomorphologie	27
4. Présentation succincte des grands ensembles géologiques de l'Algérie	33

3.1.	Oligo-Miocène Kabyle (OMK) :.....	35
3.2.	Domaine des flyschs.....	35
5.	Géologie du Djurdjura	38
3.3.	Zonation des zones internes	38
6.	Géologie locale	41
7.	Analyse Stratigraphique de la région :	45
2.	Tectonique du Djurdjura.....	47
	Contexte climatique (HYDROCLIMATOLOGIE).....	48
	Les précipitations.....	48
	La neige	49
	Température.....	50
	Humidité de l'air.....	51
	Le vent.....	51
	Hydrochimie	51
7.	Quelques schémas des formes karstiques les plus importantes du Djurdjura (Quinif 1978). 53	
	Conclusion.....	60
	Chapitre 3 : Méthodologie.....	61
1.	Introduction	62
2.	Notion de Systèmes d'Information Géographique	62
	Qu'est-ce qu'un SIG ?	62
	Autres définitions	62
	Les composants d'un SIG	63
	Mode de présentation des données géographiques	64
3.	Les principales fonctions d'un SIG	64
4.	Les différents aspects d'un SIG.....	65
	Une géodatabase (le catalogue) :	65
	Une géovisualisation (la carte) :.....	65
	Un géotraitement (la boîte à outils) :	65
5.	Définition de ArcGIS.....	66
6.	NOTIONS DE BASE SUR LA TÉLÉDÉTECTION.....	66
	Généralités sur la télédétection.....	66

Définition.....	66
Principes de base de la télédétection	66
Rayonnement et spectre électromagnétique	67
Signature spectrale.....	68
7. Processus de la télédétection	69
8. Application de la télédétection en géologie.....	70
9. Modèles Numériques de Terrain (MNT).....	71
10. Méthodologie de travail.....	71
11. L’AHP (Analytic Hierarchy Process, analyse hiérarchique des procédés)	72
Conclusion.....	75
Chapitre 4 : Analyse hiérarchique de procédés	76
Introduction	77
Application de la méthode AHP	79
Chapitre 5 : Conclusion	90
Conclusion générale	91
Référence bibliographique.....	93

LISTE DES FIGURES

Figure 1: Coupe schématique au travers d'un karst (Jean-Paul liégeois 2013).	9
Figure 2: Types de sources.	10
Figure 3: Les différentes configurations du système de drainage du karst.	12
Figure 4: Le relief karstique.	13
Figure 5: La karstification.	14
Figure 6: Zonation des karsts	18
Figure 7: Fonctionnement d'un aquifère karstique méditerranéen : Relations spatiales, vue en coupe des différentes composantes de l'eau. (Binet, 2001)	19
Figure 8: Représentation schématique des Systèmes annexes au drainage (SAD) et de leurs relations hydrauliques avec un conduit (drain). (Marsaud, B. 1997).	20
Figure 9: Les différentes configurations de karsts, selon la position du drain principal par rapport à l'exutoire [Marsaud, 1996].	21
Figure 10: Différentes zones d'un karst.	22
Figure 11: Schéma récapitulatif d'un paysage karstique (Mangin., 1975).	23
Figure 12: Situation géographique du Djurdjura.	26
Figure 13: Quelques formes de lapies.	28
Figure 14: Type de dolines	30
Figure 15: les types de poljés.	31
Figure 16: Région de Tizi Boussouil. (Extrait de Quinif 1977).	32
Figure 17: Evolution géodynamique de l'orogénèse périméditerranéenne.	37
Figure 18: Les grands ensembles de l'Algérie.	38
Figure 19: Coupe Nord-Sud des principales unités de l'Algérie. (H.Hadoum ; modifié.)	40
Figure 20: Carte géologique	41
Figure 21: Colonnes Litho-stratigraphiques des différentes unités structurales du Djurdjura (Naak, 1988).	43
Figure 22: Interprétation schématique des principaux linéaments affectant la grande Kabylie (d'après l'image sat Land-SAT, n°09532-6-01)	48
Figure 23: Coupe d'Anou Inker Temdat.	53
Figure 24: Coupe de la structure et évolution de Anou Inker Temdat.	54
Figure 25: Coupe dans le grand bogaz du lapiaz de la Terga.	55
Figure 26: Coupe d'Anou Thinichiguine appelé aussi Anou Tenchiji.	56
Figure 27: Gouffre de l'Anou Ifflis.	57

Figure 28: Coupe du Gouffre d'assouil (Anou Bousouil).	58
Figure 29: Esquisse hydrogéologique du Djurdjura d'après "Djurdjura", Spéléologie Algerienne, n°4, 1985-86-87, page 70.	59
Figure 30: Les composant d'un SIG	63
Figure 31 : Mode de présentation géographique dans un SIG	64
Figure 32: Les différents aspects d'un SIG.	66
Figure 33: Les trois éléments fondamentaux de la télédétection	67
Figure 34: Spectre électromagnétique.	68
Figure 35: Signature spectrale de quelques éléments.	69
Figure 36: Etapes des processus de la télédétection	70
Figure 37: différentes étapes de la méthode de l'analyse multicritères.	77
Figure 38: Carte des sources du Djurdjura	81
Figure 39 : Carte lithologique du Djurdjura.	82
Figure 40: Carte de la fracturation du Djurdjura	82
Figure 41: Carte de drainage du Djurdjura.	83
Figure 42: Carte de drainage du Djurdjua	83
Figure 43: Carte de l'exposition du Djurdjura.	83
Figure 44: Carte de l'occupation du sol du Djurdjura.	84
Figure 45: Carte pluviométrique du Djurdjura	85
Figure 46: Carte de courbure du Djurdjura.	85
Figure 47: Pourcentage estimé du potentiel hydrique du Djurdjura	86
Figure 48: Cartes du potentiel hydrique du Djurdjura	87

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 1: Moyennes mensuelles des précipitations pour la période 1984 – 1985 et 2018 - 2019.....	49
Tableau 2: Neiges en nombre de jours de chutes mensuelles et annuelles. (Kaci Moussa et Moali 2019).....	50
Tableau 3: Températures moyennes mensuelles (°C) à la station ONM de T.O pour la période.....	50
Tableau 4: Humidité de l'air à la station OMN de Tizi-Ouzou (2012-2019)	51
Tableau 5: Qualité chimique des cours d'eau (ANRH H. MANCER.1995).....	52
Tableau 6 : Exemples d'application de la télédétection dans différents domaines	70
Tableau 7: Echelle de comparaison des critères.....	73
Tableau 8: Critères choisis pour l'application de l'AHP	79
Tableau 9: Tableau récapitulatif des résultats de la méthode AHP	80
Tableau 10: Validation de la méthode et calcul de l'indice de cohérence.....	81
Tableau 11: Estimation du potentiel hydrique.....	86

Introduction Générale

INTRODUCTION GENERALE

L'eau est l'une des ressources les plus précieuses de la planète. Elle est essentielle à la survie de toutes formes de vie sur terre, y compris les êtres humains. Cependant la quasi-totalité des eaux de notre planète est salée (97.2%) laissant moins de 2.8% d'eau douce dont 2.1% est sous forme de glaciers et donc non disponible pour l'utilisation.

Le plus grand pourcentage des eaux utilisable revient aux eaux souterraines qui sont présentes dans les aquifères, soit dans les espaces poreux et/ou les fractures des roches, situées sous la surface de la terre. Comme la rareté de la ressource en eau nous pousse à la chercher, l'estimer pour bien la gérer et à la protéger, l'étude des aquifère devient primordiale car en plus d'être vitale pour la santé et le bien-être des êtres vivants, l'eau joue également un rôle crucial dans l'agriculture, l'industrie et la production d'énergie.

Bien connaître la géologie est la clé pour localiser les aquifères et leurs zones d'infiltrations, connaître leur géomorphologie et leur typologie, estimé leur potentiel.... Mais ceci dit, il est difficile d'avoir un vu exact et précise sur la géologie du sous-sol car elle reste inaccessible directement à l'œil humain, sauf dans les grottes karstiques, gouffres, les affleurements dans le cas d'un jeu de faille ou un anticlinal etc. Par contre plusieurs méthodes peuvent nous donner plus de précision en ce qui concerne les formations souterraines comme la géophysique (tomographie, sismique, résistivité...), les carottes et les diagraphies, les images satellitaires, l'historique des études mener sur la région, la cartographie, les cartes géologiques, la modélisation hydrogéologique ...

Aujourd'hui, environ 25 %de la population mondiale dépend en grande partie, ou entièrement, des aquifères karstiques. Ces derniers sont des formes spécifiques issus du processus de la karstification ou suffosion dans des conditions bien déterminées.

Les karsts du Djurdjura se trouvent au cœur de la région montagneuse de la Kabylie, en Algérie dans la dorsale Kabyle. Cette région renferme en son sein des merveilles et regorge de ressources naturelles qui sont le fruit d'une longue histoire géologique écrite au fil des millénaires.

Le Djurdjura possède une grande biodiversité animale et végétale ainsi que beaucoup de sources connues pour la fraîcheur et la bonne qualité de leurs eaux se faisant appeler par les hydrologues de château d'eau Persé.

PROBLEMATQUE

Est-ce que le karst du Djurdjura comme sa réputation l'indique possède vraiment un bon potentiel hydrique ? si oui, qu'on est -il de son extension dans l'espace ?

Dans ce mémoire l'étude hydrogéologique des karsts de la région du Djurdjura sera réalisée d'abord grâce à la télédétection par le billet des images satellitaires MNT « Modèle Numérique de terrain » de type digital élévation STRM télécharger du site open source USGS. Ces images satellitaires sont basées sur la technique d'ombrage, et nous permettent de cartographier l'ensemble des fractures, en combinant avec les SIG « Système d'Information Géographique » dans notre cas ArcGIS 10.5, pour réaliser la carte fracturation, de pente, d'exposition, de drainage et de densité de drainage. L'analyse de ces cartes nous aidera non seulement à établir une estimation des potentialités hydriques et comprendre le fonctionnement hydrogéologique du réservoir lui-même mais aussi à avoir plus d'information sur la vulnérabilité des karsts.

Enfin l'utilisation de la modélisation cartographique plus précisément la méthode AHP, qui combine les fonctionnalités proposées par les SIG pour la structuration des données, le croisement des couches d'information et l'analyse spatiale des différentes thématiques à l'approche d'analyse hiérarchique multicritère dite AHP. La méthode AHP permet d'assembler une multitude de critères de décision dans un seul modèle, de faire l'évaluation comparée de chaque paire de critères et de calculer leurs poids pour l'appréciation comparée de chaque paire d'options en regard de chaque sous-critère. Ce type de modèle nous permettra de visualiser les potentialités hydriques du Djurdjura distinguant e localisant ainsi les zones à fort potentiel.

Ce mémoire s'organise en quatre chapitres.

Commençant par introduction générale, celle-ci nous permettra d'entamer le sujet sans trop de détails en apportant les informations nécessaires du pourquoi du comment concernant le choix du thème du mémoire.

Le premier chapitre présente des généralités sur les karsts et les aquifères karstiques et leurs diverses approches. On y trouve toutes les informations nécessaires pour bien les décrire, les étudier et les comprendre, de leurs formations à leurs fonctionnements sans oublier l'ensemble des recherches antérieures et connaissance sur les aquifères karstiques et l'hydrogéologie en général en commençant par une description de la forme, structures, fonctionnement hydrodynamique des karsts et des systèmes karstiques, leurs classifications et clôturant avec un schéma représentatif d'un réseau karstique.

Le deuxième chapitre souligne le contexte géographique, géologique, climatique et hydrologique de la région du Djurdjura. Dans ce chapitre on procède à une étude géologique plus approfondie pour avoir une description précise des karsts présents et du milieu récepteur.

Le troisième chapitre met en évidence la méthodologie utilisée pour la réalisation de ce travail, la description de tous les outils utilisés pour la cartographie et la modélisation ainsi que le protocole de collecte des données géologiques, topographiques et hydrologique.

Le quatrième chapitre traite la discussion et l'interprétation des résultats obtenues. Dans ce chapitre on interprètera les résultats des méthodes utilisées. Toutes les informations qui peuvent être tirées après la réalisation des cartes de potentialité et de vulnérabilités des karst étudiés, l'analyse des données hydrométriques et la caractérisation des comportements spatio-temporels des karsts du Djurdjura, suivie par la simulation de ce dernier qui nous renseigne plus sur son fonctionnement contribuera à donner des réponses à la problématique de départ.

Finissant avec une conclusion générale et un récapitulatif de tout ce qu'on a eu comme résultats. On y trouvera toutes les réponses que notre étude a pu nous fournir.

Chapitre 1 : Généralités sur les karsts et les aquifères karstiques

1. Introduction

L'étude hydrogéologique des karsts ne peut être envisagée sans une bonne connaissance du milieu même. Or, avec le karst, apparaissent d'emblée des difficultés, car ce milieu complexe est souvent décrit et interprété en fonction d'une approche morphologique plus qu'hydrogéologique. Pourtant, connaître le karst implique que l'on possède une notion exacte des circulations qui l'affectent. (Mangin., 1975).

Contrairement aux terrains à perméabilité d'interstice, les circulations d'eau dans les karsts peuvent être rapide. Le degré de développement et la morphologie interne des karsts est façonnée par ces circulation qui en fonction de la lithologie présente et du climat nous donne certaines spécificités typiques des régions karstiques.

2. Les études antérieures

La Grande Kabylie est restée pendant longtemps une des régions les moins abordables de l'Algérie, tant par la situation indépendante que ses populations ont conservée jusqu'en 1857, que par les difficultés matérielles de l'exploration du massif montagneux très accidenté. Aussi les travaux des premiers explorateurs qui ont laissé tant de renseignements précieux sur d'autres points de l'Algérie, les Renou, les Fournel se bornent de ce côté à des indications vagues, obtenue des indigènes, et ayant trait surtout à l'orographie générale, et non à la géologie.

Ce n'est qu'à la suite de l'occupation définitive de la région par l'armée française au 19^{èmes} siècle à partir des années 30 que des observations, faites sur plusieurs points, par Apéron en 1867 laissant entrevoir la constitution générale, et permettent à l'ingénieur L. Ville de dresser une première carte géologique partielle de la Kabylie la même année. Les études suivantes, très localisées, n'abordent qu'une partie des questions importantes, et bien des points restent à explorer. La chaîne du Djurdjura reste encore une énigme, que les patientes recherches de Nicaise, malheureusement interrompues en 1870, ont déjà commencé à déchiffrer. Nicaise apporte plus de détails, en l'occurrence, il s'intéressa aux questions d'ordre stratigraphique, pétrographique et en partie tectonique. Les investigations les plus approfondies dans ces domaines furent réalisées par E. Ficheur (1884-1912), J. Thiebault (1939-1944) et F. Hermmam (1921-1926).

E. Ficheur en 1884 jusqu'à 1912 repris la carte géographique de L. Ville et détailla la cartographie à l'échelle (1/50 000) des feuilles N° : (8-23, 9-24, 44 et 66) englobant la plupart du territoire de la Grande Kabylie et du Djurdjura. D'autres chercheurs ont étudié le massif du Djurdjura à savoir ; (Flandrin, 1925-1936), qui a réalisé le levé géographique à 1/25 000 du Djurdjura. En 1951 Thiebault étudia les roches métamorphiques de la Grande Kabylie et signala que cette série métamorphique est continue allant des schistes ordoviciens encore fossilifères à un substrat de migmatite, l'ensemble est traversé par des granites tardifs. De 1939 jusqu'à 1944, une série de cartes géographiques et des monographies régionales ont été réalisées, ces dernières résumant les idées de tous les investigateurs. Lors de diverses années,

la géologie de la Grande Kabylie et du Djurdjura fut étudiée par L.Durpart (1912), L.Glangeaud (1932-1938), A. Lambert (1932), L.Royer (1936-1937)

P.Muraour (1950), A.Barbier(1950), A.Cailleux (1950), J.Magnier (1951/1952), J.Colamb (1958)... etc.

Des géologues Algériens et Français, ont porté un plus à la naissance géologique de cette région dans le cadre de préparation de leurs thèses de doctorats, des études géologiques, pétrographiques et gîtologiques ont été réalisés par :

- Raymond, D., 1976. Evolution sédimentaire et tectonique du nord-ouest de la Grande Kabylie (Algérie) au cours de cycle alpin. Thèse de doctorat d'Etat, Univ. Paris VI,156pp
- J.P Gelard élabore, en 1979, une étude sur la géologie du nord-est de la grande Kabylie
- Gélard, J. P, 1979. Géologie du Nord-Est de la Grande Kabylie. Thèse de Doctorat d'Etat, Mémoire. Géol. Univ.Dijon,5 :335pp.
- Les études géologiques, pétrographiques et gitologiques ont été réalisés par Raymond. (1976), Bossière (1980).
- Touahri Belkacem (1987) : Géochimie et métallogénie, minéralisation à plomb et zinc du nord de l'Algérie.
- Gani, R.,1988. Etude petro-structurale des massifs cristallins de la Larbâa Nait Irathen et de Djemââ Saharidj (Grande Kabylie, Algérie.). Thèse de Magister (Thèse 3eme cycle) 147pp.USTHB Alger.
- Saadallah. A (1992), Kolli.O (1997) et Naak.F (2010) dans le cadre de présentation de leurs thèses de doctorats ainsi que la publication de plusieurs articles concernant d'études de datations et tectoniques.
- Seddik, k. 1994. Etude structurale de la zone de cristallisation d'Azerou Aicha(Algérie) : tectonique transgressive dextre de collage. Mémoire d'ingénieur, USTHB (Alger.60p., carte h.t.)
- Monsieur Malek ABDESSELAM en 1995 dans sa thèse intitulée : Structure et fonctionnement d'un karst de montagne sous climat méditerranéen : exemple du Djurdjura occidental (Grande Kabylie Algérie) a fait l'étude des karsts de la région de Kabylie.
- Saadallah, A et al., 1996. Coulissage dextre entre zones interne et externe des Maghrebide, et structuration en fleur de la dorsale calcaire du Djurdjura (Algérie). Geodynamic Act 9,4,177-188

Concernant les travaux géophysiques, des travaux combinés de prospection électriques radiométriques et magnétiques sur le territoire de la Grande Kabylie ont été réalisés par B. Khan en 1971-1972. Également, il faut noter les levés aéro-magnétiques et aéro-

radiométriques réalisés sur tout le territoire Algérien par la firme «Aeroservice corporation de 1971 à 1974».

Une exploration géophysique a également été effectuée dans le territoire de cette région au cours des années quatre-vingt dans différents sites aurifères (Selifinov et Kostigon, 1989).

J.Thiebault (1951) signale pour la première fois la présence d'une concentration métallique dans le petit massif d'Aissa Mimoun-Balloua. En ajoutant à ces travaux, bien entendu, les différentes missions de prospection qui ont été menées par des chercheurs nationaux (R. Gani 1989, Saadallah.A 1989, A. Bettahar 1990, O.Kolli 1997, Naak 1988) sur l'ensemble du territoire de Grande Kabylie à signaler aussi l'ORGM. De nombreux indices de substances métalliques et non métalliques ont été découverts en Grande Kabylie durant près d'un siècle d'études

3. Généralités

Karst :

Le mot karst est un concept géomorphologique et morphogénétique :

On parle alors de région karstique, qu'on définit plus communément comme : « *une région constituée par des roches carbonatées, compactes et solubles dans lesquelles apparaissent des formes superficielles caractéristiques. Par extension, tout effet de la karstification des roches karstifiable* »(Paloc H., 1975, Glossaire d'hydrogéologie du karst). Le terme « karst » peut également être utilisé pour toute région constituée de roches solubles tel que le gypse, le sel, etc. (Figure 1).

Aquifère karstique :

Aquifère dont les conditions et le comportement sont régis par la complexité du karst. Parmi celles-ci, on retrouve, l'hétérogénéité, les discontinuités (compartimentage du réservoir) ainsi que la prédominance de l'écoulement des eaux souterraines par des chenaux et des conduits de grande dimension. Ces conduits karstiques ont une fonction collectrice et/ou distributrice. On peut également désigner ce type de milieu par l'existence possible de cavités de grande capacité ainsi qu'une large prépondérance de l'écoulement souterrain dans l'écoulement total du domaine correspondant.

Par ailleurs, dans un aquifère karstique, la fonction conductrice est principalement assurée par le réseau de conduits karstique interconnectés, tandis que la fonction capacitive est assurée par le milieu aquifère fissuré et/ou poreux divisé par le réseau, et/ou accessoirement par des cavités. (Figure 3).

Source karstique :

C'est une émergence permanente ou temporaire qui émane d'un réseau karstique actif : les exurgences, les résurgences et les sources vauclusiennes. Elles sont spécifiques aux aquifères

karstiques dont l'eau peut provenir en partie des cours d'eau de surface. (Gèze., 1973 et Martel., 1921).

Exsurgences :

Source dont le débit varie et qui est originaire d'une rivière souterraine, dont l'eau ne provient pas d'une perte connue d'un cours d'eau de surface, autrement dit l'aire d'alimentation est entièrement comprise dans le domaine aquifère dont elle est issue. (Fournier., 1902).

Résurgence :

Source dont le débit varie et qui est originaire d'une rivière souterraine provenant de l'engouffrement, de pertes d'un ou de plusieurs cours d'eau de surface dans un aquifère karstique. Type de source de karst distingué d'une exsurgence. (Martel., 1894)

Source vaclusienne :

Ce type particulier de source de karst est formée par l'aboutissement d'un conduit subvertical pouvant être la branche ascendante d'un siphon inverse et pénétrable seulement par plongée, dont la Fontaine de Vaucluse est le type classique. (Fournet., 1858)

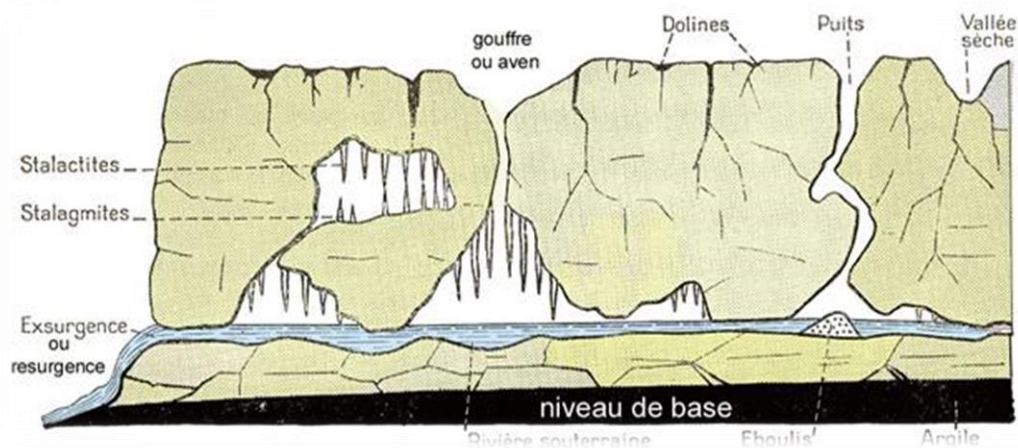


Figure 1: Coupe schématique au travers d'un karst (Jean-Paul liégeois 2013).

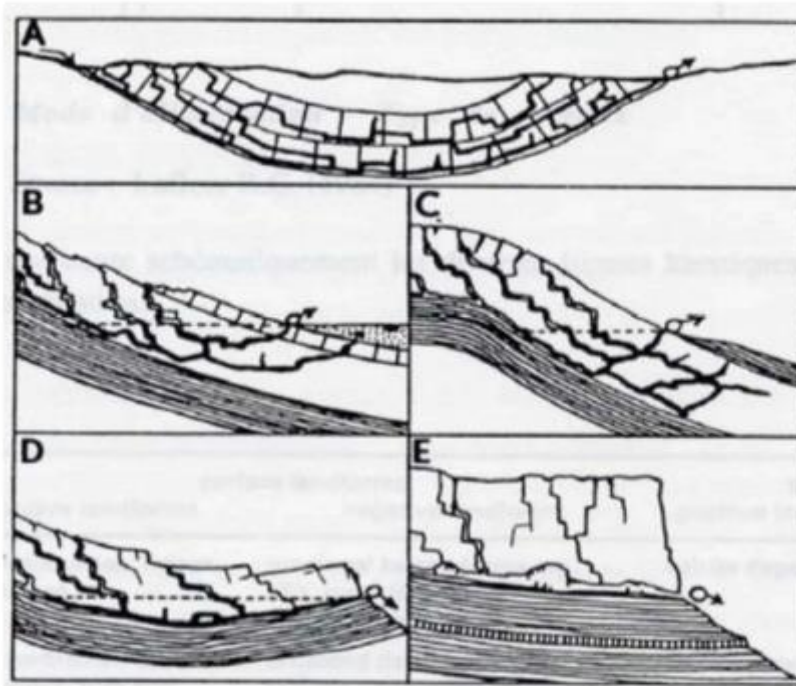


Figure 2: Types de sources.

4. Les diverses approches des karsts

Les milieux karstiques sont des milieux originaux qui ont été principalement étudiés selon trois approches : géomorphologique, spéléologique et hydrogéologique.

Tout d'abord, l'approche géomorphologique est basée sur l'étude de paramètres géographiques (climat et morphologie) qui permettent de décrire la formation des karsts et leur évolution. Cette approche est principalement basée sur la description des formes de surface (exokarst). Elle s'appuie sur deux grandes théories pour expliquer la karstogénèse. L'approche anglo-saxonne se base sur des cycles d'érosion tandis que l'approche française (Corbel, 1957) se base sur une théorie climatique de la karstification. Cependant, l'approche géomorphologique reste limitée. D'une part, elle ne prend pas en compte les phénomènes physiques qui permettent d'expliquer la formation et l'organisation des karsts. D'autre part, elle reste éloignée des objectifs de l'hydrogéologie.

L'approche spéléologique quant à elle est basée uniquement sur la description des formes souterraines (endokarst), cavernes et réseaux pénétrables par l'homme. Les principales limites de cette vision du karst sont notamment liées au fait que les observations réalisées dans les grottes ne peuvent être généralisées à un massif karstique. En outre, les seules ressources en eau se limitent aux lacs et rivières souterraines. Cependant, les observations spéléologiques peuvent fournir de bonnes informations au sujet de la karstification, lorsque celles-ci sont replacées dans un contexte hydrogéologique.

Enfin, l'approche hydrogéologique, s'appuie sur la relation fondamentale entre les écoulements et la karstification ce qui permet d'expliquer l'organisation et la hiérarchisation des vides (MANGIN, 1975, 1978). Pour les ressources en eau, cette approche s'oppose aux seules rivières souterraines et fait appel à la notion d'aquifère.

5. Structure et fonctionnement des aquifères karstiques

De manière synthétique, un aquifère est un terrain perméable qui contient de l'eau. Toutefois, d'après Mangin, 1975, en ce qui concerne les aquifères karstiques il faut prendre en compte d'autres facteurs :

➤ Le karst peut contenir un impluvium non-karstique, qui est constitué par les terrains non-karstiques dont les eaux de ruissellement sont notamment drainées par le karst, au niveau d'une perte.(Figure 2)

Contrairement aux aquifères traditionnels, la zone saturée et la zone non-saturée ne sont pas parfaitement superposées dans un karst. De plus, la zone noyée, se développe souvent à l'aval du système. (Figure 3)

Ces deux remarques montrent bien que la définition d'aquifère n'est pas suffisante. Ainsi, A. MANGIN (1975) définit le système karstique comme :« ... l'ensemble au niveau duquel les écoulements de type karstique constituent une unité de drainage» .

6. Classification des aquifères karstiques

Pour mieux caractériser les aquifères karstiques, B. MARSAUD (1996) les a classés en fonction de leur degré d'évolution, de l'organisation des vides, et de leurs écoulements internes. La classification se présente comme suit :

- Type 1 : Systèmes non-fonctionnels à faible ou fort potentiel et structure peu karstique. Systèmes pour lesquels, ni les vides ni les écoulements ne sont organisés.
- Type 2 : Systèmes fonctionnels à fort potentiel et structure karstique. Systèmes pour lesquels les vides et les écoulements sont organisés.
- Type 3 : Systèmes non-fonctionnels à faible potentiel et structure karstique. Systèmes pour lesquels les vides sont organisés tandis que les écoulements ne rendent pas compte de cette organisation.

7. L'impluvium non-karstique

Suivant la nature de l'impluvium, deux types de karsts sont distingués :

- Les karsts unaires, pour lesquels l'impluvium est constitué de terrains karstiques,
- Les karsts binaires, qui possèdent dans leur bassin versant des terrains non-karstiques et imperméables, siège d'un ruissellement. (Figure 2)

Généralement, les écoulements de surface se forment sur ces terrains et pénètrent dans le karst par des pertes situées au contact entre les deux types de formation. Le rôle de l'impluvium non-karstique est fondamental car il permet aux écoulements de converger vers

un point particulier qui n'est autre que les pertes. Ce phénomène aide à accélérer et à augmenter le développement d'une structure de drainage souterrain à partir de ce point d'entrée.

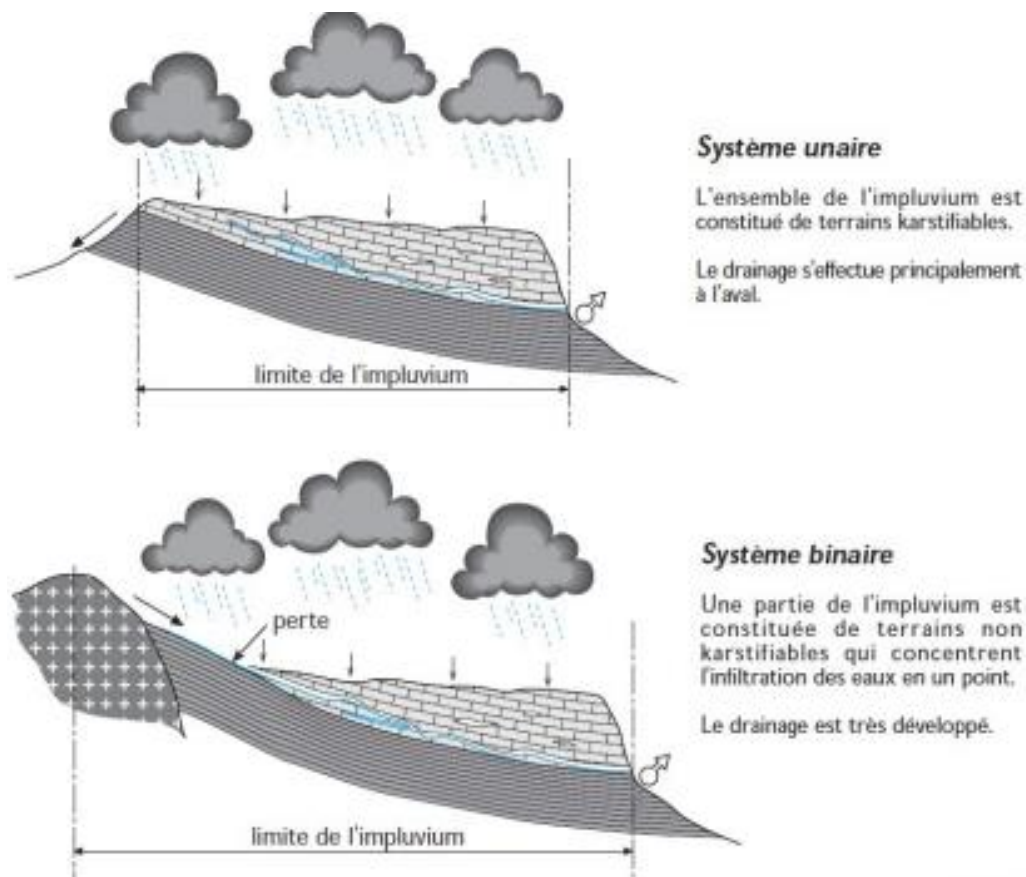


Figure 3: Les différentes configurations du système de drainage du karst.

8. Mise en place d'un paysage karstique

Le paysage karstique est le résultat géomorphologique de la mise en place d'un karst. L'étymologie du mot provient de la traduction allemande du mot slovène « Kras » qui désignait la région comprise entre le golf de Trieste, la vallée de la Vipava, la vallée de la Raša et le secteur de la Rečka. Cette région est un plateau calcaire de basse altitude dont la surface présente une morphologie particulière. En effet, on y distingue des vallées sèches, des dépressions fermées, et des manifestations typiques : gouffres, grottes, rivières souterraines. (Thibault., 2002) (Figure 3)

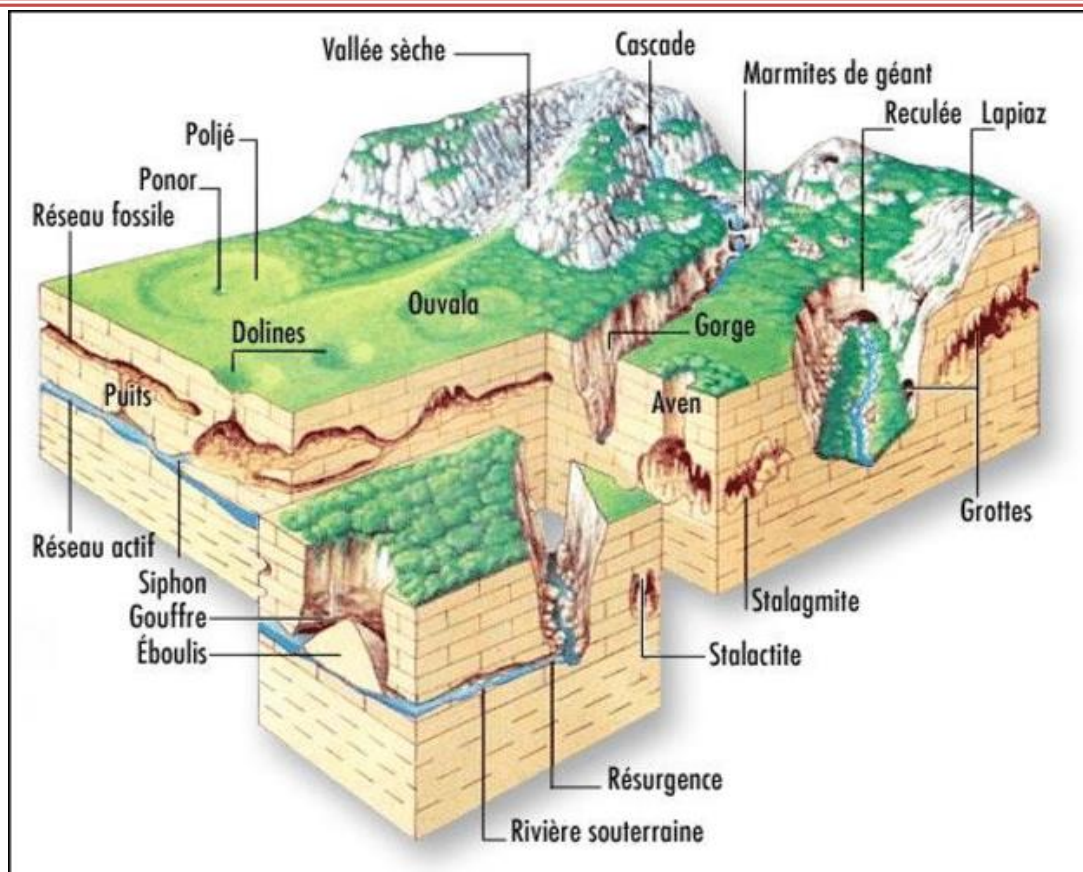


Figure 4: Le relief karstique.

Deux mécanismes peuvent être à l'origine de la formation d'un réseau karstique. Un phénomène chimique, la karstification et un phénomène physique, la suffosion.

La karstification

D'après B. Gèze (1973) il s'agit de « l'ensemble des processus de genèse et d'évolution des formes superficielles et souterraines dans une région karstique ».

La formation des aquifères karstiques se fait en plusieurs milliers d'années voir plus encore. Elle se produit essentiellement dans les milieux riches en roches carbonatées comme les calcaires ou les dolomies. Lorsque ces dernières entrent en contact avec une eau chargée en gaz carbonique contenu dans l'air ou dans le sol, elles se dissolvent. En effet, cette eau dite acide, se profère un pouvoir corrosif qui lui permet de dissoudre ces roches le plus souvent sous un climat chaud et humide. Cette dissolution fraye des chemins (vides) souterrains que l'eau emprunte préférentiellement tout en érodant les petites particules carbonatées. Les fissures ou diaclases présentes s'élargissent avec le temps et la force de l'érosion hydrique augmente jusqu'à créer des conduits souterrains et former un réseau karstique développé dans certains cas. (Figure 4).

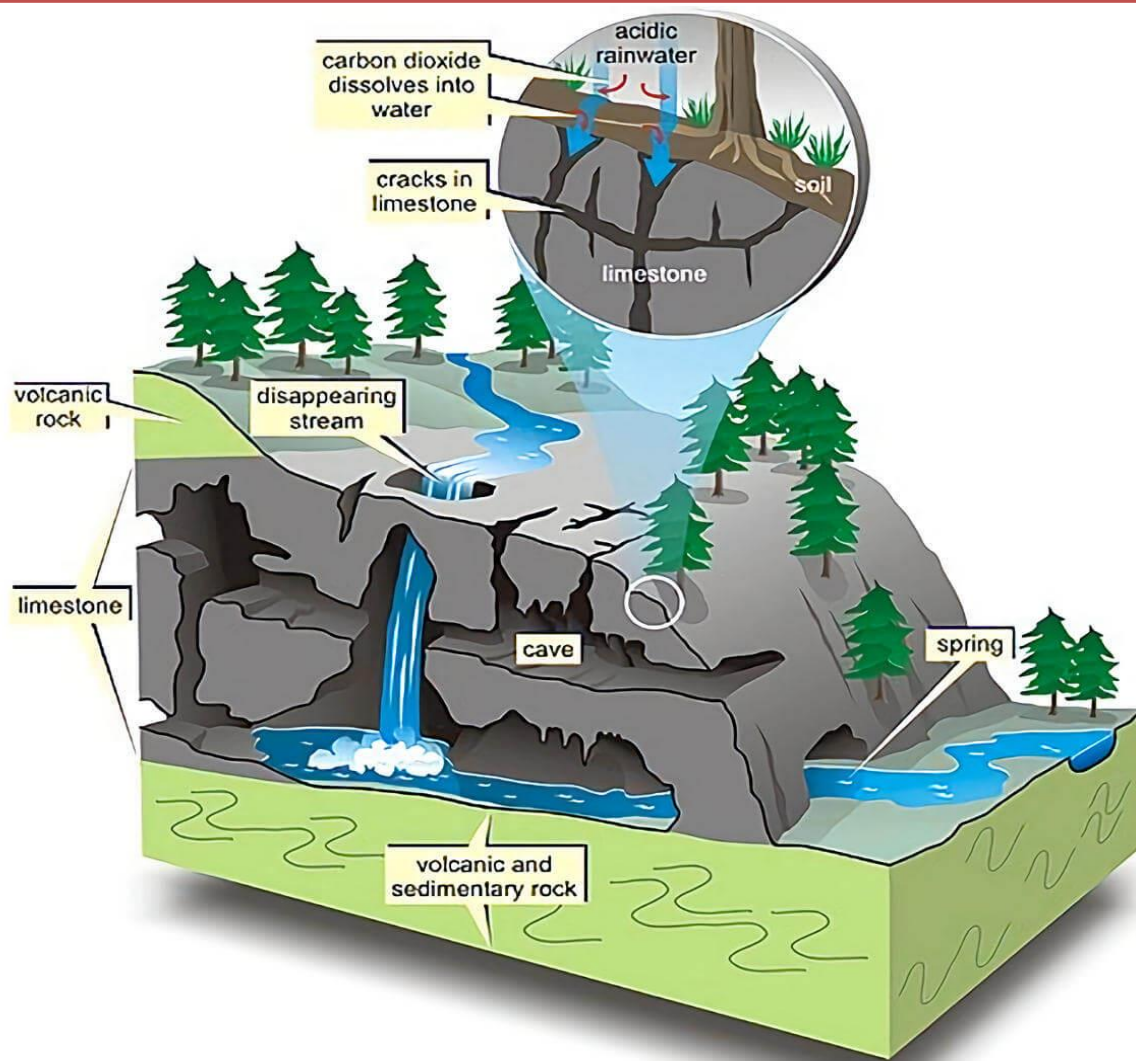
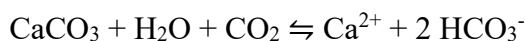


Figure 5: La karstification.

La roche soluble la plus répandue sur la planète est la roche calcaire. Cette roche se met en place au fond des océans par accumulation des carbonates précipités à partir des éléments dissous dans l'eau. Cette précipitation se fait soit par les organismes dans la construction des tests ou coraux (calcaires à entroques ou bioclastiques, calcaires récifaux et falun), soit par variation des paramètres de l'eau engendrant une précipitation autour d'un nodule, qui peut être organique ou rocheux (calcaires oolithiques ou pisolithiques) ou non(dolomies).

Par ailleurs, il est important de noter que la karstification peut concerner toute roche soluble tel que le gypse, le sel gemme etc ...

Pour les carbonates la réaction de dissolution qui se produit est la suivante :



D'après (Zergaoui et Haussard., 2016) l'intensité de ce phénomène de dissolution dépend de plusieurs paramètres. Parmi eux :

- la nature de la roche. En effet, il existe différents types de roches carbonatées possédant différentes caractéristiques physiques, chimiques et morphologiques les rendant plus ou moins vulnérables au phénomène de dissolution.
- la teneur en CO₂ dans l'eau. Les eaux fortement chargées en CO₂ vont avoir un PH faible et attaquent facilement les carbonates de calcium.
- la température de l'eau. Plus une eau est froide plus elle est capable de contenir des éléments dissous (CO₂, CaCO₃, ...) ce qui jouera un rôle important dans le transport vers l'extérieur du système des carbonates.
- la pression. Plus la pression est forte plus il est possible de dissoudre les roches solubles.
- l'abondance en eau. Une quantité plus importante permet de transporter plus de débris dissous.
- la durée du contact entre l'eau et la roche. En effet, un minimum de temps de contact entre le soluté et le solvant est nécessaire pour que la dissolution puisse s'opérer de manière optimale.

Concernant la localisation de ces phénomènes de karstification, l'emplacement des réseaux karstiques et leur développement sont fortement influencés par les caractéristiques suivantes :

- L'impluvium du point d'infiltration des eaux :

Dans le cas d'un système unaire, comme son nom l'indique, le karst est composé d'un seul élément qui est l'aquifère karstique tandis que pour un système binaire, on compte également le bassin versant de surface drainée par le point d'infiltration (doline, perte, gouffre ou aven).

- La présence et la taille du bassin versant de surface, composante d'un système karstique binaire, a un impact direct sur le développement du réseau qui varie en fonction du volume d'eau drainé. (Figure 2).

- Le positionnement des résurgences (sources) :

L'eau qui s'infiltré dans les réseaux souterrains finit par rejoindre le niveau de base d'écoulement (ruisseau, rivière, fleuve etc...) dont l'altitude va influencer la localisation des réseaux karstiques. Ces variations du niveau de base vont déterminer la fonctionnalité du réseau karstique. On parle alors de réseau karstique actif lorsque ce réseau détient une fonction drainante permanente et de réseau karstique fossile lorsque les eaux souterraines n'empruntent ce réseau que très rarement. Les réseaux fossiles peuvent néanmoins être réactivés sous l'effet de modifications des conditions locales ou régionales d'écoulement (pompage, infiltration, drainage minier, décolmatage, pluviométrie intense) ce qui amène à la réapparition de discontinuités locales pouvant engendrer des coulées boueuses. (Figure 3)

- La stratification et la tectonique des terrains :

Une phase tectonique précède généralement la formation des cavités puisque l'ouverture des discontinuités est un préalable nécessaire à l'infiltration des eaux. De plus, les alternances stratigraphiques et les failles sont des zones de faiblesses de la roche car elles sont le siège de variations des caractéristiques physiques et chimiques de cette dernière. Ces zones représentent par la suite, des orientations préférentielles pour les écoulements d'eau et pour la création de réseaux karstiques. Il est de ce fait, important d'estimer le pendage des couches ainsi que les orientations de fracturations afin d'estimer le cheminement des eaux.

- La nature des roches :

La nature de la roche impacte, comme vu précédemment, le développement du réseau mais également son orientation. En effet la structure cristallographique ou l'agencement des vides de la roche font que celle-ci est plus ou moins résistante à la dissolution.

Jusqu'à présent, nous avons évoqué les causes de formation des réseaux karstiques ainsi que les conditions physico-chimiques, hydrologiques et hydrogéologiques qui régissent l'intensité et la localisation de ces processus. Pour rappel, l'un des facteurs nécessaires à leur formation reste la présence de roches solubles et plus particulièrement, les roches carbonatées vu leur abondance sur terre. Toutefois, certains massifs calcaires ne présentent aucune formation karstique.

Nous allons de ce fait, tenter de répondre à cette question pour déchiffrer d'avantage, la complexité de ces phénomènes : pourquoi certains massifs calcaires sont karstifiés tandis que d'autres ne le sont pas ?

Ce questionnement, en apparence banal, puise ses réponses dans les conditions mêmes de la karstification. En effet, dans la littérature, nous en dénombrons trois (03) :

Dans un premier lieu, l'existence d'un massif formé de roches modérément solubles est indispensable. Ce type de formations permet une certaine pérennité des formes qui est principalement représentée par les carbonates.

En deuxième temps, la présence de solutions de continuité dans la masse rocheuse est nécessaire à l'infiltration de l'eau sous terre.

Enfin, afin de permettre aux vides formés par la dissolution des roches de ne pas se colmater systématiquement, il est nécessaire qu'une bonne quantité d'insolubles soit présente.

Cependant, l'examen de multiples massifs démontre que même si ces conditions sont remplies, les réseaux karstiques sont très variés. Depuis les labyrinthes démesurés et les gouffres les plus profonds jusqu'aux vides embryonnaires. En effet, certains massifs sont très pauvres en réseaux malgré la similitude avec les autres massifs riches en cavités. (Quinif., 1998).

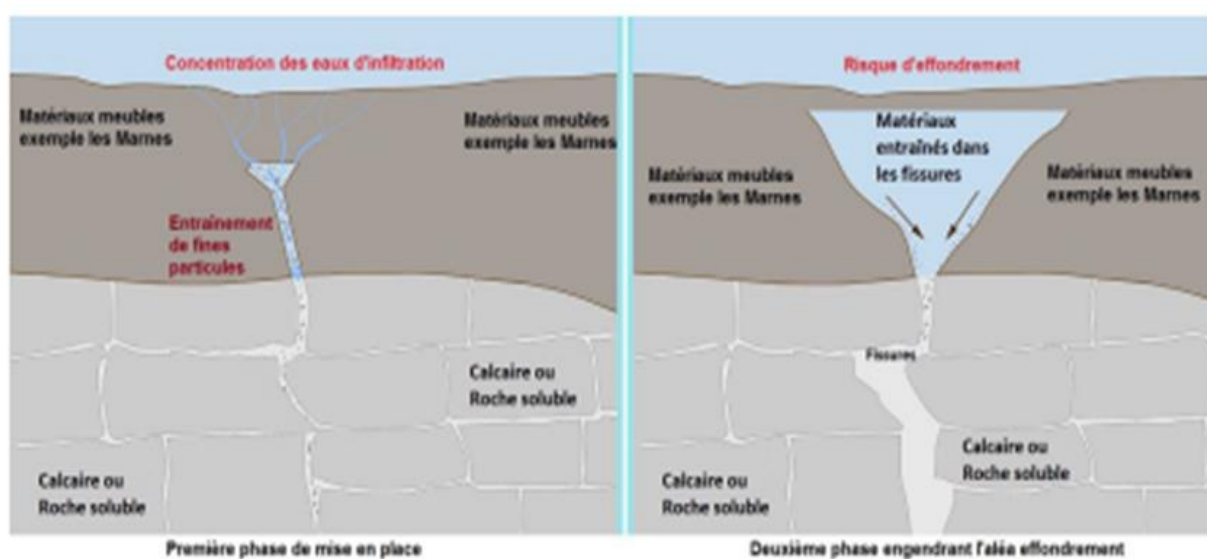
A ce stade, un autre questionnement s'impose : pourquoi seuls certains linéaments tectoniques sont karstifiés ?

Sachant que la condition première pour qu'une discontinuité dans une masse rocheuse soit karstifiée est sa capacité de drainage, nous constatons que seules quelques familles directionnelles de fractures sont utilisées. Apparaît ici, l'importance fondamentale des discontinuités empruntées par les eaux agressives et par la même occasion, de la tectonique que connaît la masse rocheuse durant la karstification. (Quinif., 1998).

La suffosion

La suffosion, contrairement à la karstification qui est un processus chimique, est un phénomène mécanique. Elle correspond à l'érosion interne générée par des circulations d'eaux souterraines. Dans les formations sédimentaires meubles, des écoulements d'eaux souterraines peuvent dans certains cas provoquer l'entraînement des particules les plus fines (marnes, schistes, sables fins, silts, ...), favorisant ainsi le développement des vides. Les matériaux entraînés sont évacués soit par les fissures ouvertes d'un horizon rocheux proche, soit dans une cavité voisine (vide karstique, cave, ouvrage d'assainissement, ...). (Figure 6).

Figure 6 : Schéma du principe d'entraînement de particules fines par suffosion.



9. Zonation des karsts

Le relief karstique de surface est appelé « exokarst ». Il peut s'illustrer sous différentes formes dont : les dolines, les lapiaz, les poljés, les gouffres, les avens, les ouvalas et les vallées sèches. La composante souterraine d'un karst est nommée « endokarst ». Ce dernier peut également se présenter sous différents aspects. On y retrouve : les cavités, les réseaux de

conduits, les stalactites et les stalagmites. Ces formes sont pour la plupart, accessibles et connues grâce à la spéléologie.

On distingue également une autre composante qui est l'« epikarst ». Une zone altérée, souvent détendue et fracturée qui joue un rôle majeur dans le stockage de l'eau, le régime et la dynamique des écoulements. (Figure 7,8).

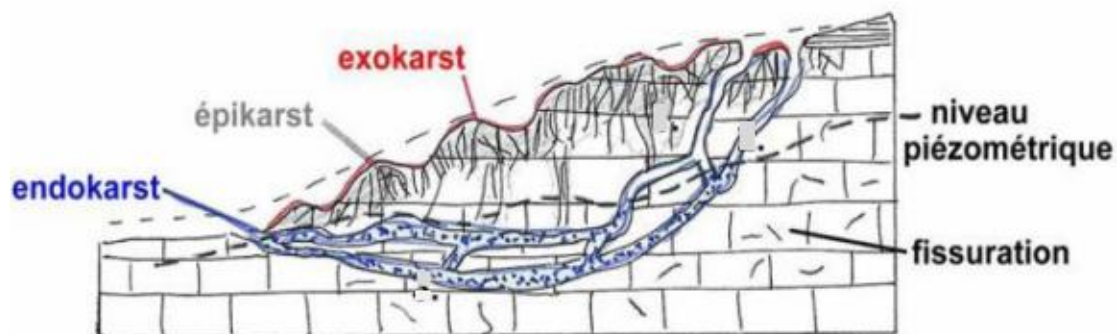


Figure 6: Zonation des karsts

L'épikarst et la zone d'infiltration

L'épikarst est la zone à l'interface sol-calcaire qui possède une karstification particulière. En effet, les fissures sont nombreuses car la pression lithostatique y est faible. Un grand nombre de ces fissures ont été élargies suite à une dissolution très intense au niveau des racines. De ce fait, cette zone représente le lieu de prédilection des eaux d'infiltration. Elle abrite des réserves importantes d'eau et joue le rôle d'un aquifère temporaire : l'aquifère épikarstique. (Figure 7).

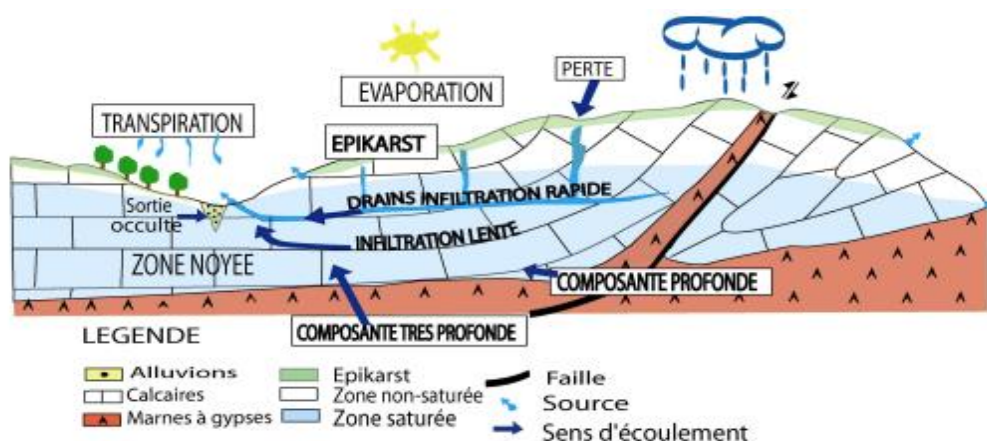


Figure 7: Fonctionnement d'un aquifère karstique méditerranéen : Relations spatiales, vue en coupe des différentes composantes de l'eau. (Binet, 2001)

Par ailleurs, la zone épikarstique joue un rôle fondamental dans la détermination du chimisme des eaux d'infiltration. Proche de la surface, les eaux d'infiltration sont mises en contact avec l'interface sol-calcaire où l'activité biologique produit de fortes quantités de gaz carbonique (CO₂). En outre, le temps de séjour des eaux d'infiltration dans l'aquifère épikarstique est particulièrement marqué par la présence de certains ions dont le chlore (Cl⁻) pour lequel la concentration augmente avec l'évapotranspiration.

Une des particularités de l'aquifère épikarstique est de réguler l'infiltration des eaux. La présence ou l'absence d'aquifère épikarstique permet de distinguer respectivement l'infiltration différée ou l'infiltration directe (BAKALOWICZ, 1979).

En fonction des types de vides dans lesquels les eaux circulent, deux autres modalités d'infiltration (MANGIN, 1975) sont distinguées :

- L'infiltration lente, qui s'effectue dans des vides de petite taille avec de fortes pertes de charge. Cette infiltration est diphasique puisqu'elle permet l'infiltration d'eau et de gaz. Autrement dit, elle assure l'alimentation en air chargé de gaz carbonique (CO₂) en profondeur.
- L'infiltration rapide quant à elle, s'effectue dans les grandes discontinuités verticales ou sub-verticales ouvertes. Cette infiltration est monophasique et l'écoulement est assimilable à un ruissellement souterrain vertical. Les eaux gardent intact leur pouvoir de dissolution car elles transitent jusqu'à la zone noyée avec une vitesse considérable (quelques heures).

De manière globale, la zone non-saturée assure le transfert de l'eau d'infiltration vers l'aquifère karstique.

La zone saturée ou le karst noyé

Contrairement à un aquifère classique, la zone non-saturée et la zone saturée d'un karst ne sont pas exactement superposées comme ça peut être le cas dans les aquifères de craie. Généralement, le karst noyé est situé à l'aval du système, proche de l'exutoire. La zone noyée constitue la principale réserve en eau de l'aquifère karstique et assure la fonction de stockage de l'eau. Cette zone est caractérisée par un réseau de drainage organisé et interdépendant et est composé d'un drain principal et de systèmes annexes au drainage (SAD). Au cours de l'écoulement dans la zone saturée, le drain principal assure la fonction transmissive, alors que les SAD assurent la fonction capacitive.

L'axe de drainage est l'axe autour duquel s'organisent les écoulements dans la zone noyée. Cet axe représente le domaine des rivières souterraines dans lequel les écoulements sont généralement très rapides et turbulents et les SAD y sont connectés de part et d'autre. (Figure 8).

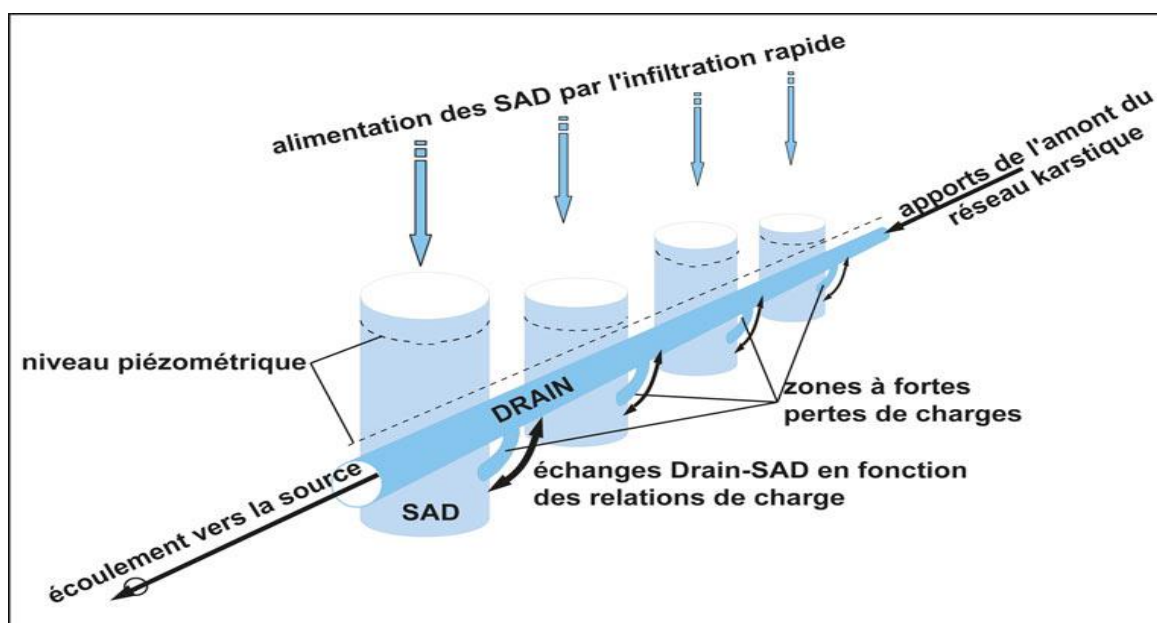


Figure 8: Représentation schématique des Systèmes annexes au drainage (SAD) et de leurs relations hydrauliques avec un conduit (drain). (Marsaud, B. 1997).

La position de l'axe de drainage par rapport à l'exutoire permet de distinguer deux types de systèmes :

➤ Le système jurassien, dans lequel l'axe de drainage est situé au voisinage du niveau de l'exutoire,

Le système vaclusien, dans lequel l'axe de drainage est situé sous le niveau de l'exutoire.

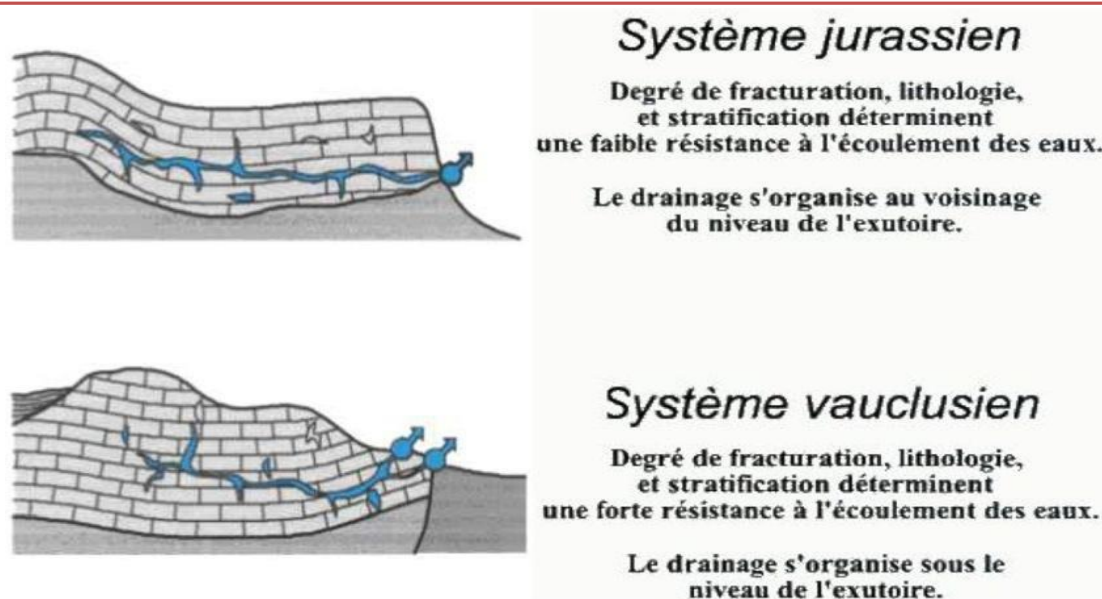


Figure 9: Les différentes configurations de karsts, selon la position du drain principal par rapport à l'exutoire [Marsaud, 1996].

Conclusion

Le karst est décrit comme un milieu où « *l'hétérogénéité atteint son paroxysme* » (De Marsily, 1984). D'après (Renault., 1977), c'est une disposition morphologique en milieu continental ou littoral, résultant de processus relevant de la géodynamique externe et caractérisée essentiellement par un système de drainage souterrain, anisotrope et hétérogène. Il s'y trouve une concentration des circulations aquifères le long des axes préférentiels qui se développent dans les trois dimensions parfois à grande profondeur. Ceci peut entraîner, lorsque la masse rocheuse concernée apparaît à la surface, le développement de formes superficielles à drainage endoréique. Ces formes sont associées à des dépôts aériens ou souterrains propres au karst (Renault., 1977).

Le karst désigne un paysage comprenant des formes superficielles (dolines, poljés, canyons, vallées sèches...) et des formes souterraines (grotte, galeries, réseaux...) associé à un régime hydrologique spécifique dont l'ensemble résulte de la dissolution des roches carbonatées ou évaporitiques.

L'organisation essentiellement verticale du karst (épi-, endo-karst) est l'aboutissement de la karstification, ensemble de processus évolutifs, associant altération physico-chimique et altération mécanique, ou de la suffosion, phénomène mécanique correspondant à l'érosion interne générée par des circulations d'eaux souterraine. Ces deux phénomènes élargissent les vides initiaux de la roche encaissante pour parvenir progressivement à la formation de structures de drainage organisées le long de chemins préférentiels d'écoulements souterrains.

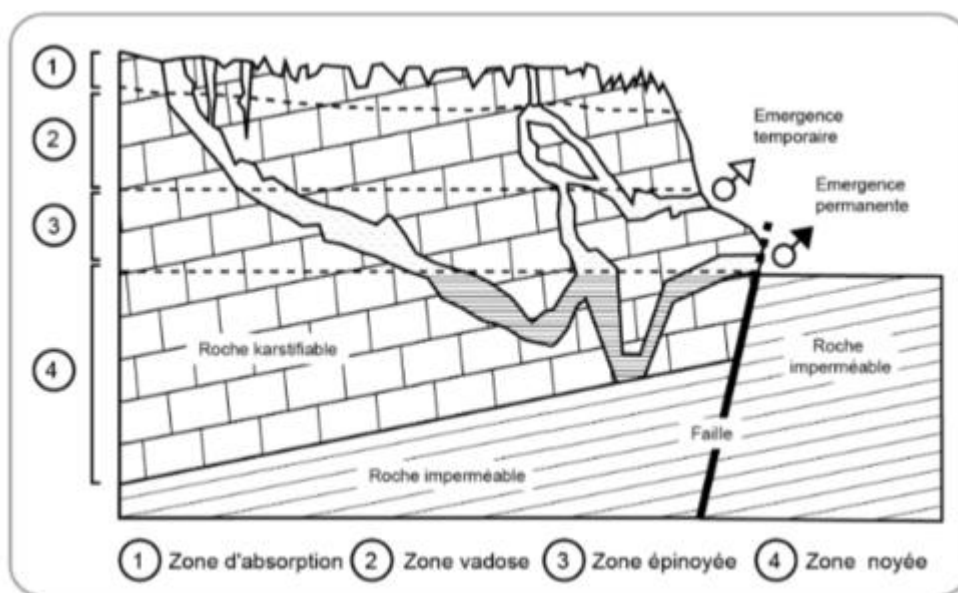


Figure 10: Différentes zones d'un karst.

Les différents facteurs qui interagissent entre eux et qui contrôlent la karstification et la suffosion se répartissent entre paramètres passifs (lithologiques, tectoniques...) et conditions aux limites hydrodynamiques entre la surface, le sous-sol et autres.

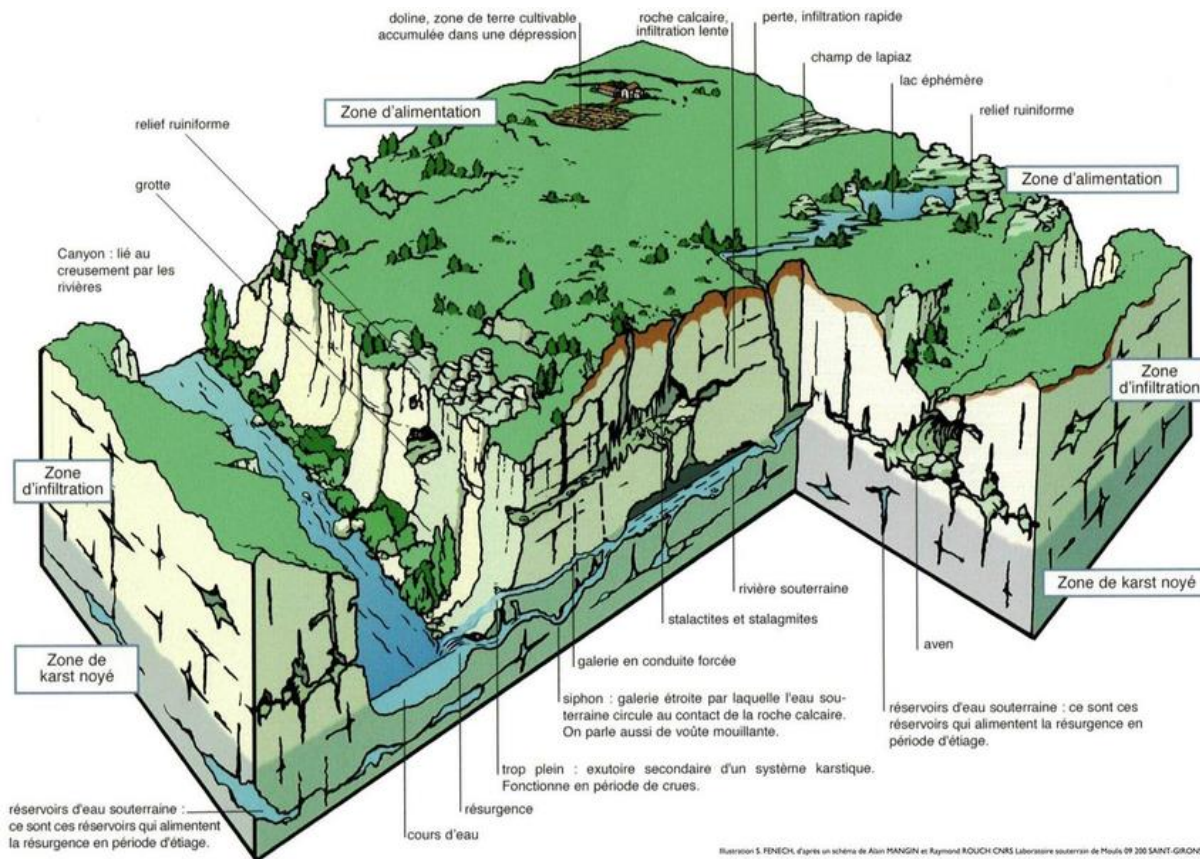


Figure 11:Schéma récapitulatif d'un paysage karstique (Mangin., 1975).

Chapitre 2 : Présentation de la zone d'étude

1. Introduction

Le Nord de l'Algérie, caractérisé par une diversité géologique et morphologique appartient au domaine alpin (Durand-Delga 1969). Il est formé de bassins néogènes limités par des chaînes de montagne. On distingue trois grandes entités, qui sont du Nord au Sud respectivement, l'Atlas tellien dont fait partie le Djurdjura, les Hauts Plateaux et l'Atlas Saharien.

Le Djurdjura par sa position, son altitude, ses importantes précipitations, ses sommets enneigés plusieurs mois de l'année et par la quasi absence d'activité humaine est considéré comme une importante réserve d'eau de qualité. La qualité et la fraîcheur de l'eau des sources du Djurdjura sont considérées comme légendaires. (Abdesselam.,1995).

2. Contexte géographique

Le Djurdjura est un massif rocheux du nord de l'Algérie précisément de la grande Kabylie dont les versants présentent des dénivelées de plus de mille mètres. Partagé entre deux wilayas Tizi-Ouzou par son flanc nord et Bouira par son flanc sud, le massif montagneux se trouve à 120 km au nord-est de la capitale et de 50 à 60 km du sud de la mer Méditerranée et s'étend dans sa majeure partie selon une direction Est-Ouest. Sa longueur est estimée à environ 110 kilomètres alors que sa largeur ne dépasse pas les 10 kilomètres et peu se réduire par endroits à un kilomètre.

Il est considéré comme la ligne de partage entre les bassins versants de la Soummam et du Sébaou. Il constitue la plus grande chaîne de montagne de Kabylie avec ses sommets qui oscillent entre 1200 m et 2308 m à Lalla Khedidja étant ainsi le plus haut sommet du Djurdjura. Cette disposition lui donne l'allure d'une muraille haute avec des arêtes rigides et déchiquetées. Les terrains tendres sont creusés de profondes et étroites vallées entre les arêtes.

Il domine vers le Sud les plaines de Bouira et la vallée de la Soummam. Vers le Nord, il domine la haute Kabylie constituée par les massifs métamorphiques à l'Est, les vallées étroites parallèles à la chaîne en son centre, et la grande dépression de Mechtras-Boghni-Dra El Mizan à l'Ouest. (Abdesselam.,1995).

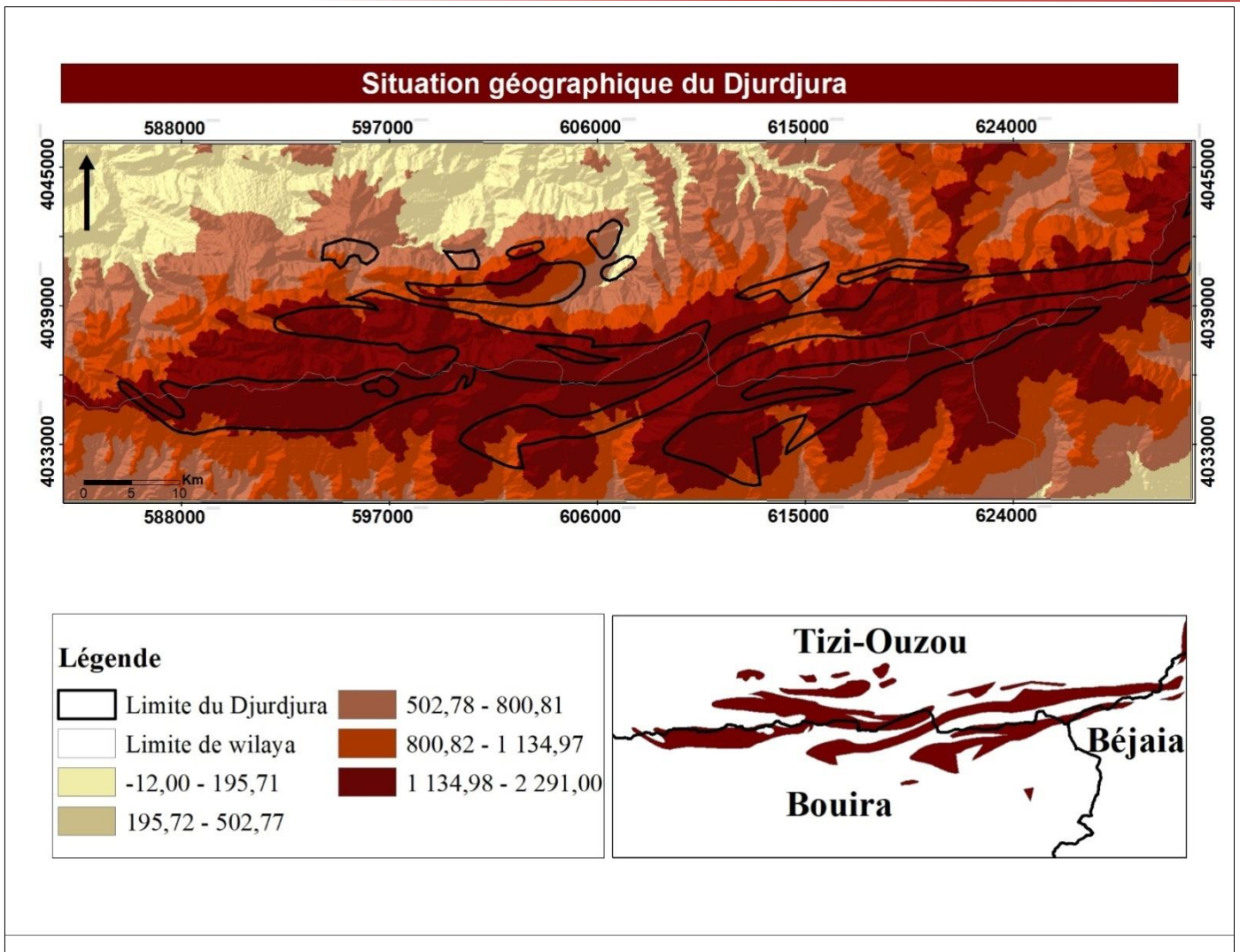


Figure 12: Situation géographique du Djurdjura.

Le polygone à été dessiné suivant les couches géologiques qui caractérise le Djurdjura.

Flandrin en 1952 divise le Djurdjura en 4 zones :

- * Les chaînons septentrionaux articulés sur le Pic du Pressoir (Tizi Guessig, 2102).
- * Les grosses masses karstifiées : Haizer, Ras Timedouine, Azerou ou Gougane, Azerou Thaltat.
- * Les longues crêtes étroites également karstifiées : Ras Tigounatine, Terga Iroumienne, Adrar Timesouine, Azerou Tidjer.
- * L'imposante pyramide de Lala Khedidja, occupant une position méridionale, prolongée à l'est par l'Azerou Madene et le massif de Tirourda,

3. Géomorphologie

La première influence sur le relief du Djurdjura est d'abord structurale. L'érosion s'exerce de façon différentielle sur des massifs soulevés par la néotectonique plio-quadernaire. Les couches continentales détritiques (conglomérats, argile) du flanc sud du Djurdjura attestent de cette érosion. De plus, la tectonisation de ces roches témoigne de mouvements simultanés et postérieurs à cette dégradation tectonique.

Les axes des crêtes calcaires résistent à l'érosion plus que les autres assises et occupent ainsi une position plus que les autres assises et occupent ainsi une position dominante. D'autre part ; les couches plus tendres évoluent en dépression subséquentes servant de bassins de réception à des oueds importants. Creusées dans le Carbonifère, elle draine les torrents descendant des flancs calcaires. L'oued ainsi formé (oued-el-Hammam) sort épigénétiquement en tranchant la barrière calcaire Adrar Timesouine - Azerou Tidjer. L'axe hydrographique Oued-el-Berd - Irhzer Tizi N'Kouilal contourne le Lala Khedidja en creusant les couches tendres du Carbonifère et du Paléogène. (Y. Quinif 1978).

Description des karsts présent dans le Djurdjura

Au niveau des bassins versants entourant le Djurdjura, il n'existe pas d'études consacrées à leurs morphologies. Toutes fois, une description géomorphologique des formes et des structures a été établie sur le Djurdjura Occidental (massif de Haizer) par Y. Guinif en 1977 (M. Abdesselam 1995).

1. Les champs de lapiés

Bien que d'étendue restreinte, ils donnent un cachet typique au karst djurdjurien.

On les trouve groupées en champs de lapiés, ou bien dispersées, entaillant d'autres formes (paroi de dolines, versant). D'après Y. Quinif les lapiés du Djurdjura ont une micro forme fondamentale se présentant ainsi :

- Les bogaz (karstgasse) : qui sont souvent de très grandes dimensions. Ce sont des dépressions dont la largeur est de quelques mètres pour une longueur atteignant plusieurs dizaines de mètres et une profondeur comprise entre 10 et 20 mètres. Ils s'établissent au détriment de failles subverticales.
- Les klufkarren sont moins développés que les bogaz; ils ne sont pas typiques du karst du Djurdjura.

- Les formes de ruissellement peuvent être énormes. Les cannelures de mur atteignent 20 mètres de haut pour un diamètre de plus de 50 cm. Elles entaillent en particulier les parois des bogaz ou elles s'alignent parallèlement les unes ou autres. Les rinnenkarren et les maanderkarren se développent aussi très fortement sur de grandes dalles obliques.

- Les aiguilles de lapiaz résultent de l'exacerbation de cannelures. Ces dernières, en se développant et se recoupant, isolent des pitons aigus aux arêtes coupantes. Leur hauteur atteint souvent plusieurs mètres.

- Des crypto-lapiés (se développant sous un remplissage) sont visibles au fond des grandes cuvettes de l'Haizer. Ils sont actuellement en voie de dégagement. Ils se caractérisent par des formes douces, l'absence d'arêtes vives ou de microformes de lapiaz aérien (cannelures, rinnenkarren, etc.).

Ces micro formes se rencontrent parfois isolées comme Haizer, flanc N du Gougane: cannelures ou rinnenkarren sur le flanc des dalles.

Dans le cas contraire, elles s'associent en champs de lapiés. Ces derniers montrent deux types opposés.

- Les lapiés de fracturation

Lapiaz de la Terga par exemple. Ils se caractérisent par les grands bogaz et les nombreux avens-tesserefts ou associations cannelures-méandres. Ils se développent sur des surfaces dont la pente est inférieure à 45°.

- Les lapiés de ruissellement

Établis là où la pente est forte, ils montrent surtout des rinnenkarren et des cannelures.

Les petits lapiés du versant Sud du Gougane sont de ce type et se développent sur des versants très raides. On y compte moins d'avens, mais au contraire des couloirs cutanés qui s'étendent à faible profondeur sous le lapiaz

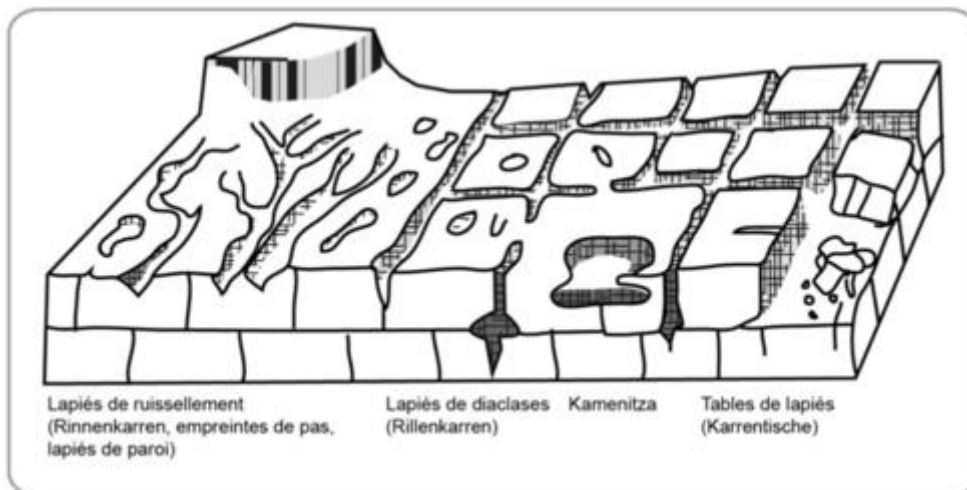


Figure 13: Quelques formes de lapiés.

2. Les Dolines : (Figure 14)

Leur distribution est irrégulière. La première chose à remarquer est leur tranche altimétrique qui s'étend de 1.500 à 2.200 m, la même que les lapiés. Ici, à l'encontre de ce qui se passe pour les karsts haut-alpins européens, il n'y a pas de distinction entre un étage à dolines suivies à plus haute altitude d'un étage à lapiés.

L'ensemble le plus remarquable est certainement le Tachgagalt, le « plateau aux dolines », dans la partie Est de L'Haizer. Les dolines y sont coalescentes et se comptent par dizaines sur un espace restreint. À certains endroits, elles ne sont séparées que par des crêtes aiguës. On distingue plusieurs types de dolines :

- La doline-puits

Souvent occupé par un névé (piège à neige). Ses parois sont verticales, entaillées par les cannelures de mur. Les dolines puits sont plus profondes que larges. Leur profondeur moyenne est de 15 m, mais elles se prolongent parfois par un méandre et préfigurent alors un véritable aven.

- La doline en cuvette

De forme opposée à la précédente. Elle est large et peu profonde. Les plus grandes, qui ont entre 50 et 100 m de diamètre, évoluent parfois vers la forme petit poljé avec plusieurs pertes localisées dans les flancs.

- Les dolines en entonnoir

Constituent une forme intermédiaire, proches des dolines-puits, mais avec un rapport profondeur - largeur plus petit. Elles montrent aussi des cannelures de mur.

- Les dolines en entonnoir asymétrique,

Formes parfois géantes (100 mètres de diamètre, 50 m de profondeur), elles sont nombreuses sur les versants. Elles ne contiennent pas de névé permanent.

On rencontre également des dolines ailleurs sur le Djurdjura, mais en nombre beaucoup moins grand. Elles défoncent parfois les champs de lapiés (dolines-puits du champ de lapiés de la Terga). On en trouve même sur les crêtes (dolines asymétriques de la crête de l'Azerou-ou-Gougane). Elles s'associent çà et là en dépression plus complexes (Tachgagalt surtout).

D'une manière générale, les dolines ne permettent pas une pénétration au sein de la masse calcaire. À part quelques dolines-puits du Tachgagalt qui en constituent un stade élémentaire, elles ne se transforment pas en aven. Aucune cavité actuellement connue ne démarre par une doline.

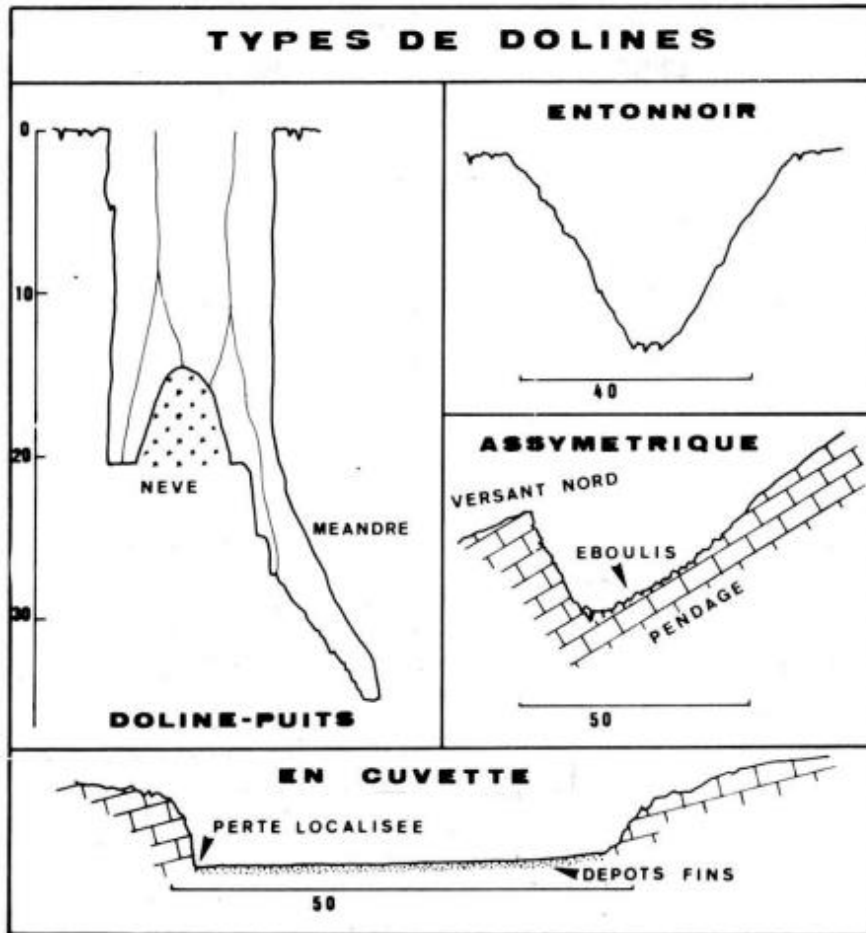


Figure 14: Type de dolines

3. Les depressions fermees de type polje.

Tizi Boussouil constitue l'archétype de la grande dépression fermée du Djurdjura, la plus connue aussi (Figure 23) Au fond d'une cuvette d'origine essentiellement structurale se rassemblent de nombreux talwegs qui fonctionnent en temps de crues (orages violents et fonte des neiges). L'exutoire de ces talwegs est le gouffre : l'Inker Temdat pour la cuvette Nord et l'Anou N'Boussouil pour la cuvette Sud. Ce n'est pas un poljé au sens strict du terme : pas d'aplanissement alluvial, pas d'engorgement des ponors, écoulement torrentiel.

La cuvette doit sa position à la structure : situées sur les couches tendres et imperméables du Trias et du Paléogène, elle se trouve coincée entre deux écailles calcaires (Lias inférieur). Ce sont donc les charriages qui, en faisant se chevaucher des écailles successives comprenant des assises calcaires et imperméables, sont la cause de cette disposition (Quinif, 1977).

Les poljés de l'Haizer occupent une position structurale de même nature, si bien que les assises imperméables concernées sont différentes : bassin d'écoulement constitué par des conglomérats tertiaires, des marnes lutétiennes et sénoniennes. Les eaux s'écoulent ainsi vers

le calcaire liasique ou elles s'enfouissent sur le pourtour des bassins fermés. Ces derniers ont ici un caractère de poljé beaucoup plus marqué. Ils présentent des surfaces d'aplanissements alluvial, les talwegs y sont beaucoup moins imprimés, les ponors s'engorgent lors des crues.

Remarquons que la présence d'un crypto-lapiaz déjà cité montre que les cuvettes sont en voie de creusement par l'enlèvement de la couverture alluviale. La capacité des ponors augmente donc actuellement.

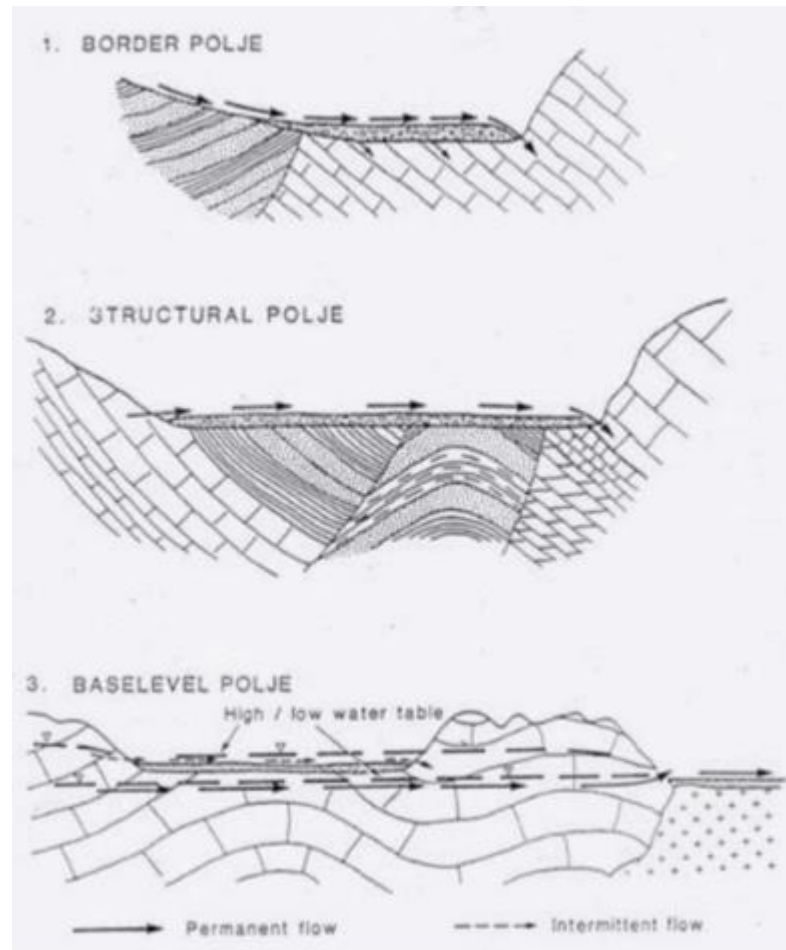
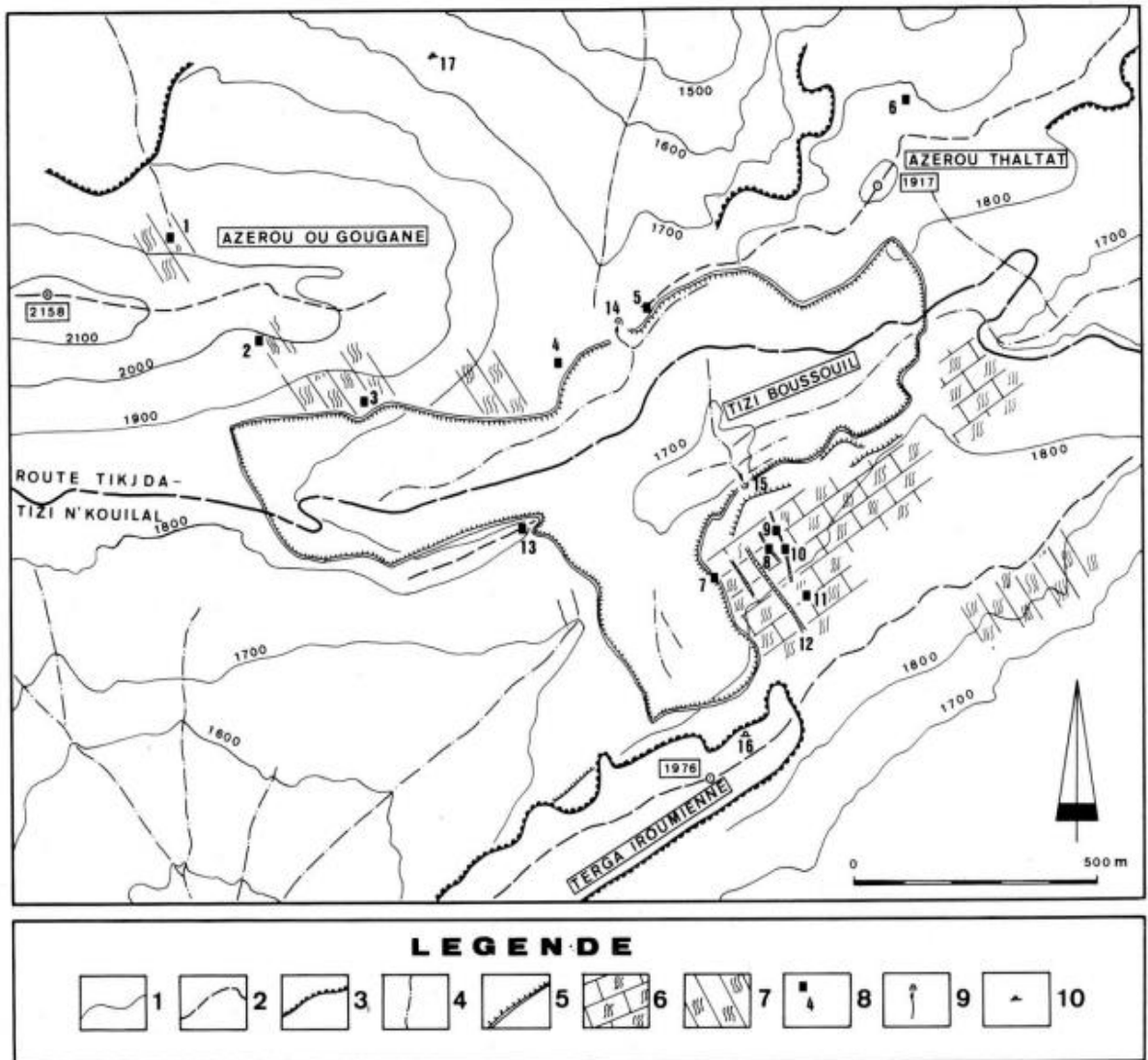


Figure 15: les types de poljés.



Légende :

1-Courbes de niveau (équidistance : 100m).

2-Axe des crêtes.

3-Parois verticales (plus de 50m).

4-Axe de talweg.

5-Aven de 15m.

6-Lapiaz surtout de fracturation.

7-Lapiaz surtout de ruissèlement.

8-Cavité (Voir liste ci-dessous) :

Liste des cavités :

1-Tessereft de 30 m.

9-Anou Manarf,meandre.

2-Tessereft de 20 m.

10-Anou Pas vu pas pris.

3-Aven de 30 m.

11-Aven de 30 m.

4-Groupe de 2 petits avens.

12-Grand bogaz.

5-Aven de 15 m.

13-Aven de 15 m.

6-Aven de 25m.

14-Anou Inker Temdat.

7-Aven de 13 m.

15-Anou Bousouil.

8-Tessereft Messaoud.

16-Grotte perchee de la Terga.

Figure 16:Région de Tizi Bousouil. (Extrait de Quinif 1977).

4. Les agounis.

Il n'est pas possible de passer cette forme particulière sous silence. Se rapprochant d'un karstgasse, elle s'en distingue par ses caractères morphologiques et sa position topographique.

Ce sont de grands couloirs en fond de bateau, montrant une direction préférentielle, profonds de plus de 50 m pour une largeur de quelques dizaines de mètres et une longueur supérieure à 100 m. Leur fond est encombré d'éboulis gigantesques, renfermant des névés à ciel ouvert. Ils sont dû a la conjonction entre une fracturation tectonique très forte dont la direction principale est parallèle a un grand versant (agounis de la Dent du Lion sur l'Haizer, agounis du Ras Timedouine)

4. Présentation succincte des grands ensembles géologiques de l'Algérie

L'Algérie dans son ensemble a été façonnée par une longue histoire de plus de 3.5 Milliards d'années (Ga)

Les géosciences permettent de distinguer 2 grands ensembles majeurs qui correspondent à des entités géographiques : Le Sud Saharien ou domaine méridional et Le Nord Atlasique appelé aussi le domaine septentrional.

Le Sahara Algérien, au sens large, commence au pied Sud de l'Atlas Saharien pour couvrir tout le sud du pays ; alors que le Nord Atlasique, incluant le chaînon de l'Atlas Saharien, couvre tout le nord jusqu'à la mer Méditerranée. (Saadallah., 2016).

Le domaine méridional correspond à l'ensemble Sud Saharien qui a bénéficié d'une histoire essentiellement africaine ayant appartenu au Gondwana tandis que le domaine septentrional « Nord Atlasique » a été structuré par l'Orogenèse Alpine et la formation de la mer Méditerranée. Cet ensemble a été accolé au Sahara vers 40 Ma, le long d'une grande faille (décrochement dextre) qui porte le nom de l'Accident Sud Atlasique (ASA).

Les grands ensembles géologiques de l'Algérie septentrionale appartiennent à la chaîne alpine des Maghrébides (Crétacé-Miocène). Les formations dominantes sont des ensembles sédimentaires du Mésozoïque et Cénozoïque, avec quelques rares apparitions de terrains Paléozoïques, de formations métamorphiques et de complexes magmatiques.

Ces grands ensembles de l'Algérie alpine commencent du Sud au Nord par :

- L'Avant Pays Atlasique ou l'autochtone présaharien assurant la jonction entre la chaîne tellienne au nord et la plateforme saharienne au sud à laquelle il est suturé le long de la flexure sud atlasique. L'avant pays atlasique est formé essentiellement de terrains Mésozoïques avec une couverture Paléozoïque de son sous bassin. Il est constitué de :

L'Atlas Saharien, une zone déformée constituant des chaînons culminants à près de 1200m d'altitude. Elle s'étend de la frontière Marocaine jusqu'à la frontière Tunisienne, caractérisée par des anticlinaux étroits coffrés et des synclinaux larges à fond plat en relais et

orientés NE-SO. Le Trias, gypso-salin, constitue souvent un niveau de décollement majeur et affleure aussi en diapirs. (Saadallah., 2016).

- Les Hautes Plaines, également appelées hauts plateaux, correspondant à une zone autochtone qui comprend de l'Ouest à l'Est : la Meseta Oranaise, les Hautes Plaines algéroises et constantinoises, reliées par la chaîne du Hodna qui est légèrement chevauchée par l'Atlas Saharien.

- La Zone Externe Tellienne : Au Nord du domaine Atlasique, comprend la zone externe des Maghrébides, principalement le Tell du Nord de l'Algérie. Elle se limite au sud par le Front Sud des Nappes Telliennes, et au Nord par l'Accident Sud Kabyle. (Saadallah., 2016).

On y distingue les zones autochtones, les nappes telliennes, les flysch et les formations molassiques.

Les Zones Autochtones : sont des terrains jurassiques (datés ou assimilés) et crétacé (parfois d'âge inconnu) dont le déplacement est considéré nul ou relativement peu important.

Les Nappes Telliennes : sont quant à eux, des terrains charriés essentiellement d'âge crétacé et de nature marneuse avec souvent des semelles de trias salifère qui affleurent sur des grandes surfaces dans le Tell.

Les flysch : forment la partie supérieure de la pile de Nappes Telliennes et sont d'âge crétacé.

Les Formations Molassiques : les formations molassiques ou apparentées Flyschs et Oligo-Miocène regroupent essentiellement le Numidien et certaines formations grésomiacées comme les grès de Boghari. Ces formations affleurent souvent au sommet des empilements de nappes telliennes.

Ces quatre (4) ensembles géologiques sont structurés par deux événements majeurs :

- 1) La tectonique chevauchante d'âge miocène inférieur,
- 2) la distension mio-pliocène synchrone de l'ouverture méditerranéenne.

La tectonique transcurrente éocène semble être absente ou mal caractérisée par les études de terrains connues à ce jour. (Saadallah., 2016)

- La Zone Interne : le domaine interne des Maghrébides appelée aussi domaine kabyle (la majeure partie de cette zone est en Kabylie) faisait partie d'un terrain mésoméditerranéen situé il y a 10 Ma d'années à l'intérieur du domaine téthysien. Il est situé entre les plaques Iberia et Europe au Nord, Apulia à l'Est et Africa au Sud (Guerra *et al.*, 1993) appelé AlKaPeCa (Bouillin *et al.*, 1986). (Al : Alboran, Ka : Kabylie, Pe : Péloritains et Ca : Calabre les différents massifs internes de l'orogène périméditerranéen, qui appartenaient à la marge européenne. (Figure n°17).

Lors de la fermeture de la Téthys, le bloc Kabylie du microcontinent l'AlKaPeCa s'accrole au Nord de l'Algérie et rentre en collision avec la Zone Externe Tellienne.

Ces facies traduisent des conditions de sédimentation de plus en plus profonde en allant d'un domaine continental à un domaine marin très profond, lorsqu'on passe des formations de la Dorsale interne, vers la Dorsale médiane et la Dorsale externe.

3.1.Oligo-Miocène Kabyle (OMK) :

Il constitue la couverture transgressive et discordante du socle kabyle. C'est une formation détritique qui comporte à sa base des conglomérats de l'oligocène supérieur, surmonté par des grès micacés à débris de socle ainsi que des silexites à radiolarite d'âge Aquitanien.

3.2.Domaine des flyschs

Ce sont des alternances de grès et d'argiles qui sont formées à l'origine dans un environnement marin. Les sédiments détritiques qui se déposent proche de la côte, sur la plateforme continentale, sont régulièrement déstabilisés par l'action des tempêtes, des mouvements tectoniques, ou simplement par leur propre poids qui les entraîne dans la pente du talus continental. Le mouvement de ces sédiments non consolidés va créer des avalanches sous-marines chargées en boues et en sables. C'est ce que l'on appelle un courant de turbidité. Ces avalanches vont dévaler la pente du talus continental et les sédiments vont finir par se déposer au niveau du glaciais, à l'entrée de la plaine abyssale, pour former ce que l'on appelle une turbidité ou un complexe turbiditique. En fonction de leur puissance et de la charge sédimentaire, chaque courant de turbidité va aller plus ou moins loin. Ces avalanches sous-marines vont ainsi se répéter régulièrement, formant à chaque fois une nouvelle séquence de matériel détritique se déposant sur la précédente et intercalée par un niveau plus argileux qui se dépose en période de calme. Avec l'enfouissement, le processus de diagenèse commence, transformant les séquences détritiques en bancs de grès. Les flyschs sont donc le résultat final de cette succession de complexes turbiditiques, déposés les uns sur les autres au fil des millions d'années.

Les flyschs sont connues par leurs complexités structurales à cause de la pauvreté de celle-ci en fossiles (Bendif & Beldjilali, 2018).

. Type de flyschs

1. Flysch mauritanien

Comporte, un flysch calcaire Néocomien à radiolarites attribuées au Crétacé, un flysch à gros bancs des grés (schisto-gréseux) d'âge Crétacé inférieur (Néocomien à Albien) c'est le flysch de type Guerrouch, un flysch cénomanien conglomératique à bande silicifiées blanches très caractéristique suivie d'une série d'âge Sénonien à Lutétien supérieur plus ou moins conglomératique.

Au-dessus, se dépose durant l'Oligocène, une série grés-micacée puissante débutant par un flysch à micro-brèche et atteignant le passage Stampien-Aquitainien.

2. Flysch massylien

Comprend de bas en haut, un Néocomien de calcaire sableux et des argiles sur 10 m d'épaisseur, un Albo-Aptien (300 m) pélito-quartzeux où dominant les couleurs vertes; surmonté par un Vraconien épais de quelques mètres de calcaire fins jaunâtres, un Cénomaniens et un Turonien sur 20 m d'épaisseur à phanites noirs et blancs localement remplacées par des brèches polychromes (Raoult & JF, 1974) et un ensemble flyschoidemarno-microbrèche où l'ondate tous les étages du Sénonien et qui peut dépasser 200 m d'épaisseur.

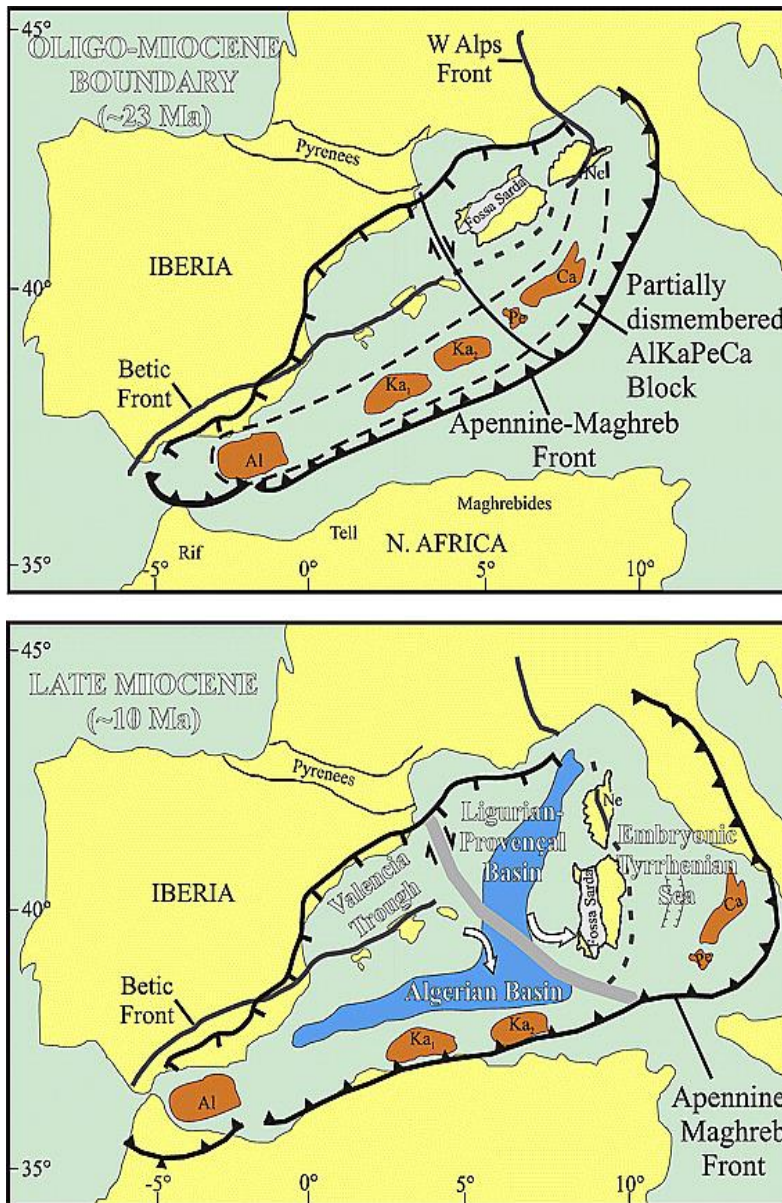
Des formations tertiaires aujourd'hui décalées et repoussées où sud comprennent des argiles

vertes et des niveaux de silèxite. Cet ensemble atteint l'Oligocène inférieur.

3. Flysch numidien

Ce terme a été proposé par (Ficheur, 1890) pour désigner la trilogie suivante :

Des argiles versicolores à tubotomaculum dite argiles sous-numidiennes, des bancs de grès épais à grains hétérogènes et des argiles, marnes et silèxites appelé supra-numidiennes.



(a) L'Oligocène tardif-début du Miocène.

(b) L'évolution tectonique du bloc Sardaigne-Corse à la fin du Miocène.

Modifié d'après Gueguen et al (1998).

Al, bloc Alboran ; Ka, Grande kabylie ; Ka2, Petite Kabylie ; Pe, montagnes Peloritani ; Ca, Calabre.

L'unité Nebbio de Corse NE (Dallan et Puccinelli, 1995) est considérée ici comme faisant partie du bloc AlKaPeCa, conformément à Molli (2008).

Figure 17: Evolution géodynamique de l'orogénèse périméditerranéenne.

- Les terrains magmatiques et sédimentaires dits Post-Nappes sont présents dans tous les ensembles cités précédemment. Les formations sédimentaires Miocène supérieur - Quaternaire recouvrent en discordance les différentes unités précédentes, et sont disposées postérieurement aux grands chevauchements des Zones Internes, des Nappes de Flyschs et des Nappes Tellienne formant ainsi de grands bassins « Post-Nappes ». Au sein des bassins Post-Nappes littoraux, s'est mis en place un magmatisme d'âge Miocène et quaternaire.

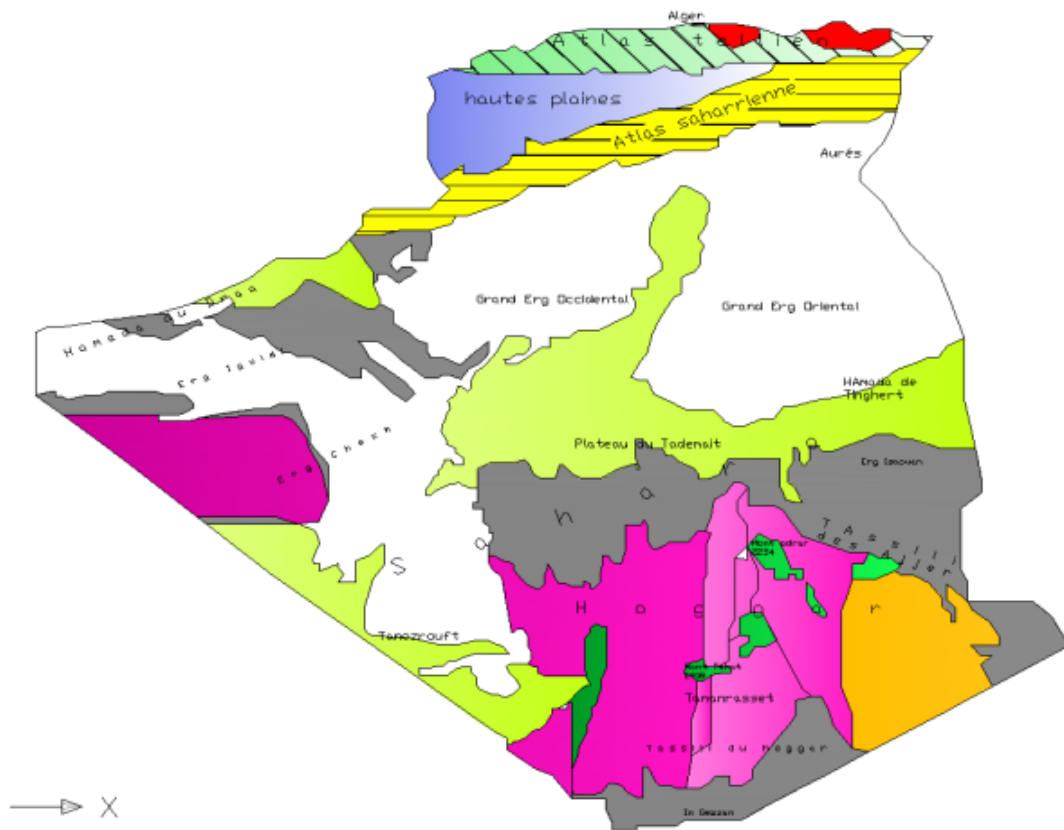


Figure 18: Les grands ensembles de l'Algérie.

5. Géologie du Djurdjura

3.3. Zonation des zones internes

Le massif de grande Kabylie, comme celui de Ténès, du Chenoua ou d'Alger, fait partie des zones internes appelée également domaine septentrional, domaine interne ou Kabylides. Les zones internes englobent trois parties :

- Un socle cristallophyllien antécambrien : il s'agit d'édifices de nappes cristallines avec un synmétamorphisme alpin ou hercynien ou les deux à la fois.
- Les terrains d'âge Paléozoïques : sont des terrains non métamorphiques, en contact cataclasique avec le cristallin.

c. La dorsale kabyle : représente quant à elle, la couverture sédimentaire fortement plissée et fracturée du socle.

a) **Le socle cristalloyphyllien**

Le socle cristalloyphyllien également appelé socle cristallin (Durand Delga, 1969 ; Bossière, 1980 et Bouillin ,1984), socle anté - Silurien (Durand, Delga, 1952-55), ou encore le cristallin de Kabylies (Saadallah, 1992), affleure dans trois régions en Algérie : au niveau du massif de Chénoua à l'Ouest, dans la Grande Kabylie au centre et dans la Petite Kabylie à l'Est.

Le cristallin kabyle est composé par un ensemble de matériel cristalloyphyllien métamorphique qui à son tour est recouvert par une couverture sédimentaire d'âge Paléozoïque Supérieur peu ou pas métamorphique. « *Le socle cristallin est un socle gneissique ancien très métamorphique d'âge anté - Paléozoïque à la base (noyau), recouvert en discordance par une série schisteuse peu métamorphique d'âge Paléozoïque.* » (Bossière 1980).

Des dépôts détritiques sous forme des molasses conglomératiques d'âge Oligocène supérieur, Miocène inférieur, appelé Oligo- Miocène Kabyle (OMK) sont discordant sur le socle par endroit. Des niveaux carbonatés mésozoïques et cénozoïques de la dorsale Kabyle bordent au sud le socle kabyle.

Les études pétro-structurale et la cartographie du socle kabyle montrent, que le cristallin kabyle est constitué par une succession d'unités tectoniques, empilées les unes sur les autres (Gani, 1988 ; Benkerrou, 1989 ; Loumi, 1989 ; Bettahar, 1990 ; Saadallah, 1992). Partant des critères variés, un certain nombre d'unités ont été définies (nappes de socle). Ces unités sont représentées de bas en haut par :

1. L'unité des paragneiss, qui renferme des kinzigites à la base (Gani, 1988).
2. La nappe "crocodile" de Sidi-Ali Bounab (Bettahar, 1990), qui est en extrusion dans les paragneiss.
3. L'unité des micaschistes.
4. L'unité des schistes satinés.

b) **Les terrains d'âge Paléozoïques :** sont constitués de formation datée du Cambrien supérieur au Carbonifère et représentent le substratum autochtone de la dorsale kabyle.

c) **La dorsale kabyle :**

La dorsale Kabyle (Durand Delga, 1969), ou (chaîne calcaire de L. Glangeaud ,1932), est la bordure sud du socle Kabyle. Elle se présente sous forme d'écaillés d'âge Trias -Eocène moyen (Lutétien).

Dressée comme une barrière entre les formations tendres du massif métamorphique au Nord et du crétacé de type flysch au Sud, cette chaîne s'allonge sur environ 50 km, depuis les

villages d'Alouane et Tizi Djaboub (méridien de Boghni) à l'Ouest jusqu'aux abords du col de Chellata à l'Est. Sa largeur atteinte sur le méridien de Tikjda – Kouriet ne dépasse pas les 10 km et décroît rapidement vers l'Est.

Bouillin (1986) affirme que la dorsale kabyle est composée des calcaires du Lias et de l'Eocène, des dolomies du Trias au Lias inférieur et de grès du Permo-Trias.

Plusieurs auteurs, à commencer par Flandrin 1952 ont établi une zonation de la dorsale kabyle. Ainsi 3 groupes de chaînons élémentaires, qui présentent chacun leur particularités morphostructurales ont été définis du Nord au Sud :

- La dorsale interne « Unité de Kouriette » : elle regroupe l'ensemble des chaînons septentrionaux qui constituent le massif de Kouriet et ses annexes d'Agouni Gueghrane, Tikourabine et Agouni Bou-Amane, le massif du Pic 1865 et du Djbel Tiassassine, le chaînon de Djemaa Bou-Serou, Tarzou Bou-Arous et Arzou Djemaa, et le Pic de Tizi-Guessig.

Cette unité est caractérisée par des dépôts littoraux ou épicontinentaux (inter supratidale) de couleur rouge dû à la faible tranche d'eau (oxyde dolomitisé) d'âge Permo-Trias à Oligocène.

- La dorsale médiane « Unité de Tikjda » : constituée par l'ensemble Haizer-Akouker culminant au massif du Thaltat (Main des Juifs) 1638m. Cette unité est marquée par des dépôts marneux et plus profonds composée de calcaire sparitique à faune (ammonite) d'âge Crétacé à Eocène.

- La dorsale externe « Unité de Lalla Khedidja » : constituant le domaine méridional de cette chaîne. La dorsale comprend une succession de crêtes correspondant à l'anticlinal de Tikejda-Ait Ouabane, où apparaissent les Djebels du Taouialt de Ras Timedouine, de Targa Ouroumi, de l'Azrou Tijer et de Adrar Timessouine. Les massifs culminants de Lalla Khadidja (2308m) prolongent à l'Est cette chaîne par les crêtes des Azrou-Medène, Azrou-Tirourda et Azrou n'Thorcette unité représentant un milieu profond. La dorsale est épaisse et à texture fine (mudstone radiolarites au Dogger – Malm).

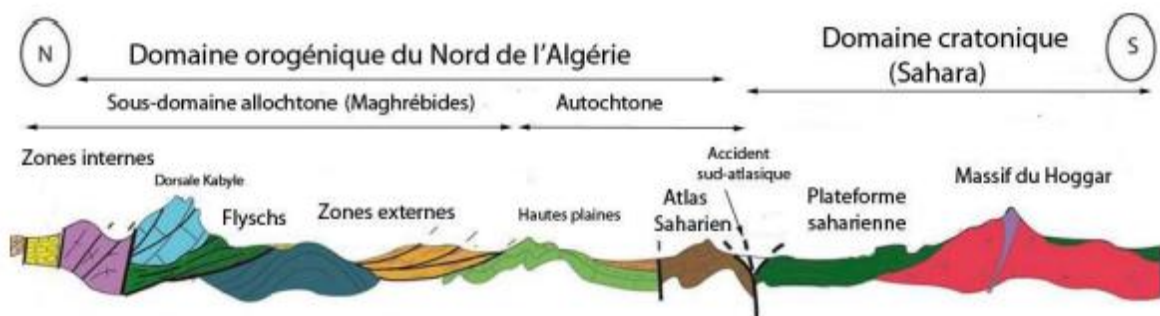


Figure 19: Coupe Nord-Sud des principales unités de l'Algérie. (H.Hadoum ; modifié.)

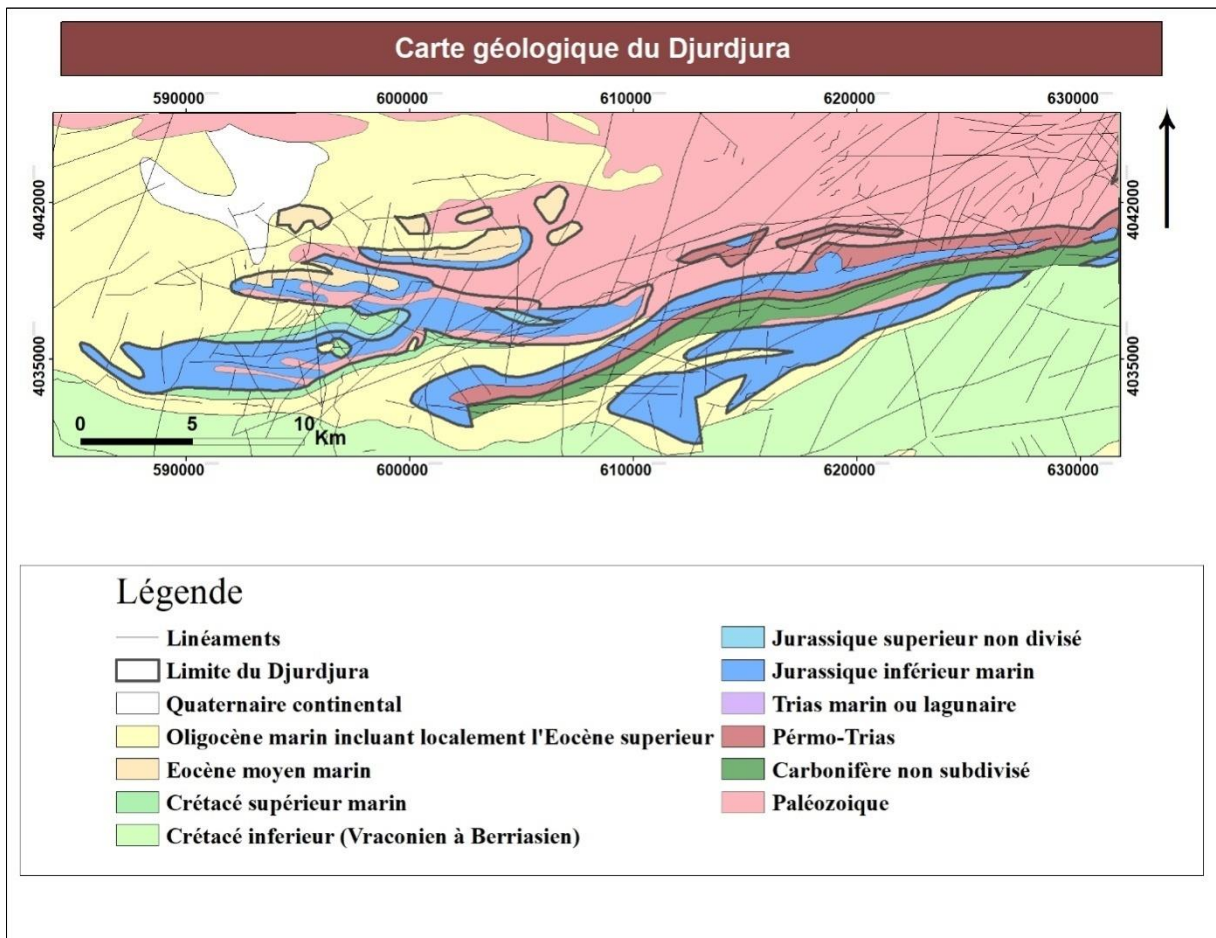


Figure 20: Carte géologique

6. Géologie locale

Les karsts du Djurdjura se trouvent au cœur de la région montagneuse de la Kabylie, dans la dorsale kabyle, zone de hauts-fonds bordant au Mésozoïque et à l'Eocène le socle kabyle en partie émergé et proche des zones de flyschs dans lesquelles se sédimentaient d'épaisses séries terrigènes (Coutelle, 1976).

Plusieurs auteurs, à commencer par Flandrin (1952), Durand-Delga (1969), Raymond(1976), Gélard (1979), Coutelle (1979), Gery (1979) et Naak (1988) ont établi un zonage de la chaîne calcaire. Ainsi trois (03) groupes de chaînons élémentaires ont été définis. Du Nord vers le Sud, ou de l'intérieur vers l'extérieur s'ordonnent les unités suivantes (Figure n° 17):

- **Unités Septentrionale - Dorsale interne :**

Cette dorsale englobe l'ensemble des chaînons septentrionaux qui regroupent le massif de Kouriet et ses annexes d'Agouni Gueghrane, de Tikourabine et d'Agouni Bou-Amane, le

massif du pic du Djebel Tiassassine, le chaînon de Djemaa Bou-Serou, Tarzou Bou-Arous et Azrou Djemeaa, et le pic de Tizi-Guessig.

- **Dorsale médiane :**

Celle-ci englobe l'ensemble Haïzer-Akouker culminant aux massifs de Tachgaguelt de Gouguane et de Thaltat (Main des Juifs). L'ensemble occupe une position structurale relativement centrale ou « axiale » de la chaîne. Ce dernier qui présente une série stratigraphique relativement plus puissante, est limité au Nord par une zone de contact anormal complexe, plus au moins redressée à l'affleurement.

- **Dorsale externe :**

Constituant le domaine méridional de cette chaîne. La dorsale comprend la succession des crêtes correspondant à l'anticlinal de Tikejda-Ait Ouabane, où apparaissent les Djebels du Taouialt de Ras Timedouine, de Targa Ouroumi, de l'Azrou Tijer et de Adrar Timessouine. Les massifs culminants de Lalla Khadidja(2308m) prolongent à l'Est cette chaîne par les crêtes des Azrou-Medène, Azrou-Tirourda et Azrou n'Thor.

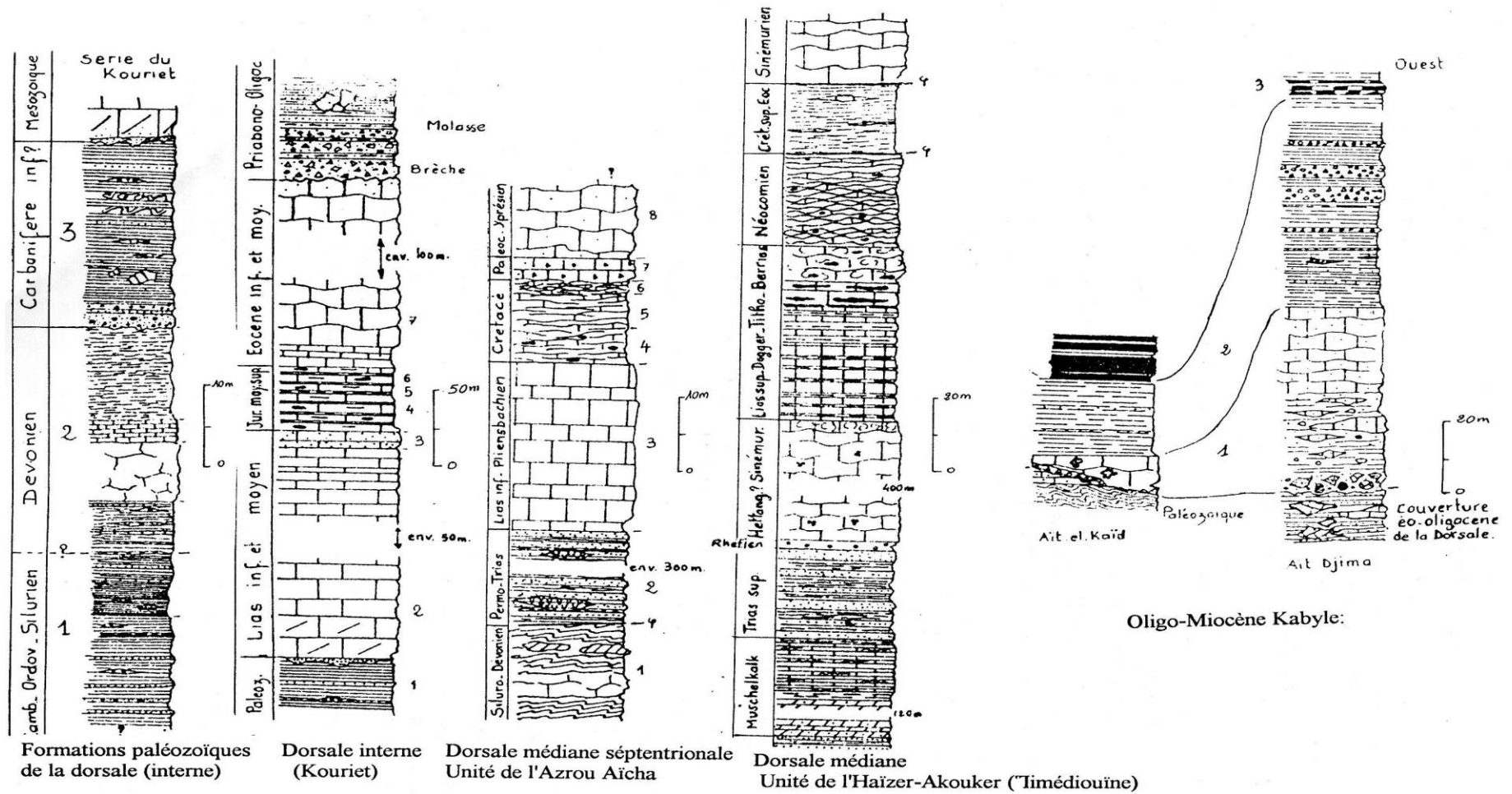


Figure 21: Colonnes Litho-stratigraphiques des différentes unités structurales du Djurdjura (Naak, 1988).

- **Contenu des logs stratigraphiques.**

- **Formations paléozoïques de la dorsale (interne) :**

1. Terme inférieur : Cambro-Ordovico-Silurien : complexe schisto-quartzitique sombre, à intercalations de microconglomérats et de bancs lenticulaires de cipolins.
2. Terme moyen : ensemble grésopélique gris verdâtre à intercalations de microconglomérats et de cipolins. Barre de calcaires marmoréens massifs, surmontée de calcaires en dalles et un ensemble de calcschistes roses et verts et de dolomies massives. Des niveaux volcano-sédimentaires se trouvent parfois à la base de la série carbonatée.
3. Terme supérieur : Conglomérat à éléments centimétriques à décimétriques provenant des termes sous-jacents et du socle métamorphique. Formation schisto-gréseuse, à conglomérats lenticulaires, lentilles de calcaires sombre et blocs de calcaires des formations sous-jacentes dans une matrice grésopélique.

- **Dorsale interne (Kouriet) :**

1. Substratum paléozoïque ; Permo-Trias : grès et pélites rouges.
2. Lias inf. Sinémurien : calcaires et dolomies gréseuses, rubanées.
3. Lias moyen-sup : calcaires jaunes-orangés, gréseux, en bancs métriques.
4. Lias sup- Dogger : calcaires micritiques en bancs décimétriques à silex.
5. Jurassique sup. basal : calcaires marneux à silex.
6. Tithonique : calcaire micritiques à calpionelles et radiolaires.
7. Cuisien-Lutézien : calcaires dolomitiques en gros bancs, bioclastiques à Mélobésies et discocyclines, à détritiques (chargé en quartz) au sommet.
8. Priabonien-Oligocène : brèche polygénique remaniant socle et dorsale. Molasse Eo-Oligocène.

- **Dorsale médiane septentrionale-Unité de l'Azrou Aicha :**

De haut en bas :

1. Épais complexe à schistes, grès, calcaires et dolomies du Dévonien. Formation schisto-quartzitique à coulées volcaniques du Siluro-Dévonien.
2. Permo Trias : Formation argilo gréseuse à intercalations de niveaux conglomératiques, injectée de coulées de roches vertes (dolérites). Les grès rouges, parfois gris dominant.
3. Lias inf. à Pliensbachien : calcaires massifs à cassures claires.
4. Crétacé : Berriasien-Valanginien : calcaires rouges ou gris claires à silex.
5. Albo-Cénomaniens : calcaire à schistosité micritique.
6. Campanien-Maestrichtien : calcaires biomicritiques.
7. Paléocène : calcaires sombres biodétritiques.
8. Yprésien : calcaires blancs à Mélobésies et discocyclines.

- **Dorsale médiane – Unité de l'Haizer-Akouker (Timédouine) :**

De bas en haut :

1. Muschelkalk : grès et pélites rouges inférieurs, dolomies litées en bancs jointifs, piriteuses, calcaires gris vermiculés à myophories à rares intercalations marneuses ou de dolomies jaunâtres.
2. Trias sup : grès rouges ou jaunâtres et pélites supérieurs.
3. Rhétien : microconglomérat à dragées centimétriques de quartz et lydiennes.
4. Lias inférieur : Héttangien-Sinémurien : calcaires massifs, blancs, Ostracodes, Echinodermes, grumeleux au sommet et rubéfiés.

5. Lias sup- Dogger : alternances de marnes, calcaires gris clairs, noduleux rouges et grumeleux rose à ammonites en banc décimétriques.
6. Tithonique-Berriasien : micrite à Radiolaires en petits bancs du Tithonoque. Calcaires grumeleux à bandes siliceuses et micrite à Radiolaires.
7. Néocomien : marno-calcaires à silex, calcaires grumeleux à silex noirs à schistosités.
8. Crétacé sup-Eocène : série marno-calcaires noirs du Sénonien. Calcaires à silex durs. Série détritique et bancs de calcaires sableux bio-détritique du Paléocène.
9. Sinémurien : calcaires massifs.
10. Molasse Eo-Oligocène : Conglomérats et bancs métriques.

• **L'Oligo-Miocène Kabyle :**

1. Terme sup : Silexites à développement variable, en lit de quelques millimètres intercalés dans les marnes. Elles se présentent aussi en falaise (20m) à rares intercalations marneuses ou argileuses jaunes-verdâtres. Age radiométrique : 19 Ma \pm 1 (Gélard et Bellon 1975).
2. Terme moyen : Série détritique, microbrèche à élément de socle dominants, puis alternance argilo-marneuse avec de rares récurrences de détritiques grossiers.
3. Terme.inf : il est variable ;
 - Sur le socle : brèches à éléments de socle à matrice argilo-sableuse rouge d'épaisseur variable (remplissage de paléovallées).
 - Sur les calcaires de la dorsale interne : brèche à éléments dorsaliens, passant à un conglomérat grossier dont les éléments du Paléozoïque, sont usés dans une matrice argileuse ou bien à une barre calcaire à algues et Lépidocyclines.
 - Sur la couverture Eo-Oligocène de la dorsale : une discordance nette sépare ces deux cycles molassiques successifs. Brèche (ou conglomérat) de base épaisse de la dorsale passant à des calcaires biodétritiques à association de faune caractérisant l'Oligocène terminal (C.Lorenz).

7. Analyse Stratigraphique de la région :

1. Le massif métamorphique Kabyle :

Cette série cristallophyllienne est interprétée comme d'anciens dépôts (Bossière 1980) de type flysch alimentés par un continent renfermant des argiles résiduelles ayant subi un métamorphisme intense. On y rencontre principalement des schistes satinés et des micaschistes. On y trouve aussi mais en moins grande abondance ; des pegmatites, d'aplites et quartz laiteux. Il est à signaler que ces terrains cristallophylliens du Djurdjura, ne se trouvent que dans deux régions éloignées l'une de l'autre :

- Dans les chaînons septentrionaux (massif de Kouriet, Agouni Bou Amane au Nord et Djebel Tiassassine au Sud « Pic de 1865m »).
- Dans la partie orientale de l'anticlinal Tikejda-Ait Ouabane où les schistes cristallins constituent une bande étroite et allongée.

2. Le Paléozoïque :

Le Primaire est largement représenté dans le Djurdjura par des dépôts du Carbonifère. On distingue de bas en haut et sur une épaisseur d'environ 500 mètres les formations suivantes :

- Des schistes gris à rares intercalations de grès fins micacés et de lydienes.

- Alternance de schistes micacés, de psammites à débris régionaux et de grès fins. Ces formations forment un affleurement d'environ 26 Km de long sur 1 Km de large qui part de Tikejda à l'Ouest et se termine au col de Chellata à l'Est.

3. Le Permo-Trias et Trias :

Le Trias du Djurdjura est caractérisé par l'absence de formations salifères (Flandrine, 1952) contrairement au Trias des autres régions alpines algériennes. Toutefois, quelques amas lenticulaires de gypse localisés à la base de Trias ont été signalés dans cette chaîne.

4. L'infra Lias et Trias inférieur :

L'infra-Lias comprend des calcaires à cargneules, des dolomies pulvérulentes, des calcaires gréseux et des calcaires dolomitiques. Cet ensemble épais de plus de 60 mètres marque le premier retour de la mer sur une partie du Djurdjura.

5. Le Lias moyen et supérieur :

Cet étage regroupe le Domérien, le Toarcien et l'Aalénien qui constituent un ensemble carbonaté distinct des calcaires massifs du Lias inférieur. Ils sont représentés par une série variée où dominent les calcaires en plaquettes à silex, des marno-calcaires et des marnes.

6. Le Jurassique : (Tithonique) ;

Dans le Jurassique, le terrain le plus ancien qui succède au Lias supérieur est le Tithonique dont les dépôts reposent en transgression. Il est connu que dans les unités de Haizer-Akouker et à l'extrême bordure Nord de l'unité de Tikejda et dans le massif de Djebel Tiassassine.

7. Le Crétacé inférieur : (Berriasien, Valanginien et Albien)

L'absence de cet étage sur toutes les unités structurales du Djurdjura est dû certainement à l'action de l'érosion.

Toutes fois, on ne connaît pas de dépôts relatifs à l'Hauterivien, au Barrémien et à l'Aptien (J.Flandrin 1952). A cette époque, il est vraisemblable que le Djurdjura a connu une phase d'émersion ou non dépôt sous l'action de courants sous-marins. Seules les marnes noires à Néohibolites minimus (marnes noires argileuses à rognons pyriteux « 300m ») de l'Albien existent dans cette chaîne.

8. Le Crétacé supérieur : (Sénonien) ;

Le Cénomaniens et le Turonien sont inconnus dans le Djurdjura. Seul le Sénonien représenté par des marnes a été observé dans les unités de Haizer-Akouker et de Tikejda-Ait Ouabane.

Le Crétacé est largement représenté au Sud de la chaîne par un ensemble à matériel détritique appelé flysch Sud Kabyle.

9. L'Eocène : (Lutétien) :

Le Lutétien est représenté par deux faciès distincts :

- Dans les chaînons septentrionaux, il est essentiellement représenté par des calcaires massifs à nummulites qui forment les reliefs les plus importants.

Dans les unités de Haizer-Akouker et dans l'anticlinal de Tikejda-Ait Ouabane, le Lutétien présente un faciès de calcaires marneux, de marnes calcaires et des marnes. Signalons que le Lutétien surmonte différentes formations ; les terrains métamorphiques au Nord de la chaîne,

le Lias dans les unités médianes et le Berriasien ou le Tithonique dans les massifs méridionaux

10. L'Oligocène et le Miocène (Molasse de couverture de la dorsale) ;

Les faciès de cette série Oligo-Miocène se résume comme suit (Naak 1988) ;

- Un conglomérat ou brèche de base (formations massives à ciment calcaire).
- Un terme moyen gréseux grossier, argilo-gréseux vers le haut.
- Un terme supérieur à marno-silexites.

11. Eboulis et cônes de déjection torrentiels :

Les grandes falaises du Djurdjura sont souvent bordées par d'importantes masses d'éboulis qui sont cimentés et se transforment en brèches extrêmement compactes au point d'être confondues parfois avec des affleurements du Lias inférieur.

Ces formations sont importantes de point de vue hydrogéologique. A titre d'exemple, au débouché du défilé de Tabourt El Ançeur, s'étale un immense cône de déjection torrentiel dont les deux branches traversent la dépression de Boghni et de Mechtras, où sont implantés quelques forages à débits intéressants.

2. Tectonique du Djurdjura

Le Djurdjura comme décrit avant, a une structure très complexe, faite d'unités écaillées, redressées souvent à la verticale, découpées par des accidents longitudinaux et transversaux. Des recouvrements par des formations détritiques de grandes épaisseurs, viennent masquer les structures, en plus des dépôts récents en flanc de talus et dans les dépressions.

Cette situation rend difficile toute recherche d'aquifère. Ceux-ci formés par les roches carbonatées, et milieux discontinus. La délimitation de leur géométrie (limites et directions des sens d'écoulements) nécessite une connaissance exacte des principales directions préférentielles des écoulements fossiles ou actuels, à des directions de grande perméabilité de l'aquifère calcaire (Droque.1975). La mise en évidence des maximums de fracturation permet de reconnaître les principales directions de circulation des eaux.

Les différentes phases tectoniques alpines ont bouleversé toutes les séries du Djurdjura (Coutelle, 1976). Elles se caractérisent essentiellement par de très importants charriages du Nord au Sud qui ont provoqué le chevauchement sur une grande échelle des différentes unités: flysch de différents types, socle kabyle, chaîne calcaire, matériel tellien.

De plus, la dorsale se retrouve elle-même sous la forme d'une série d'écaillles correspondant aux différentes unités de la chaîne calcaire, empilées les unes sur les autres.

Le rôle de la néotectonique est primordial : elle a provoqué le soulèvement et la fracturation de ce dispositif, le redressant parfois presque à la verticale.

Cette histoire morpho-structurale a ainsi donné au Djurdjura ce cachet si caractéristique d'écaillles successives possédant chacune une épaisse série calcaire qui se retrouve en position dominante. De là, découlent ces hautes crêtes calcaires allongées parallèlement les unes aux autres et séparées par des dépressions subséquentes, dégagées dans des terrains plus tendres

(détritiques du Carbonifère, Permo-Trias, etc...), ayant évolué soit en vallées ouvertes sur le bas pays par des gorges épigénétiques au travers des barres calcaires (Oued-el Hammam par exemple), soit en cuvettes fermées avec écoulement souterrain (Tizi Bousouil, Quinif, 1977).

L'intense tectonisation des massifs calcaires a une importance majeure sur les phénomènes karstiques.

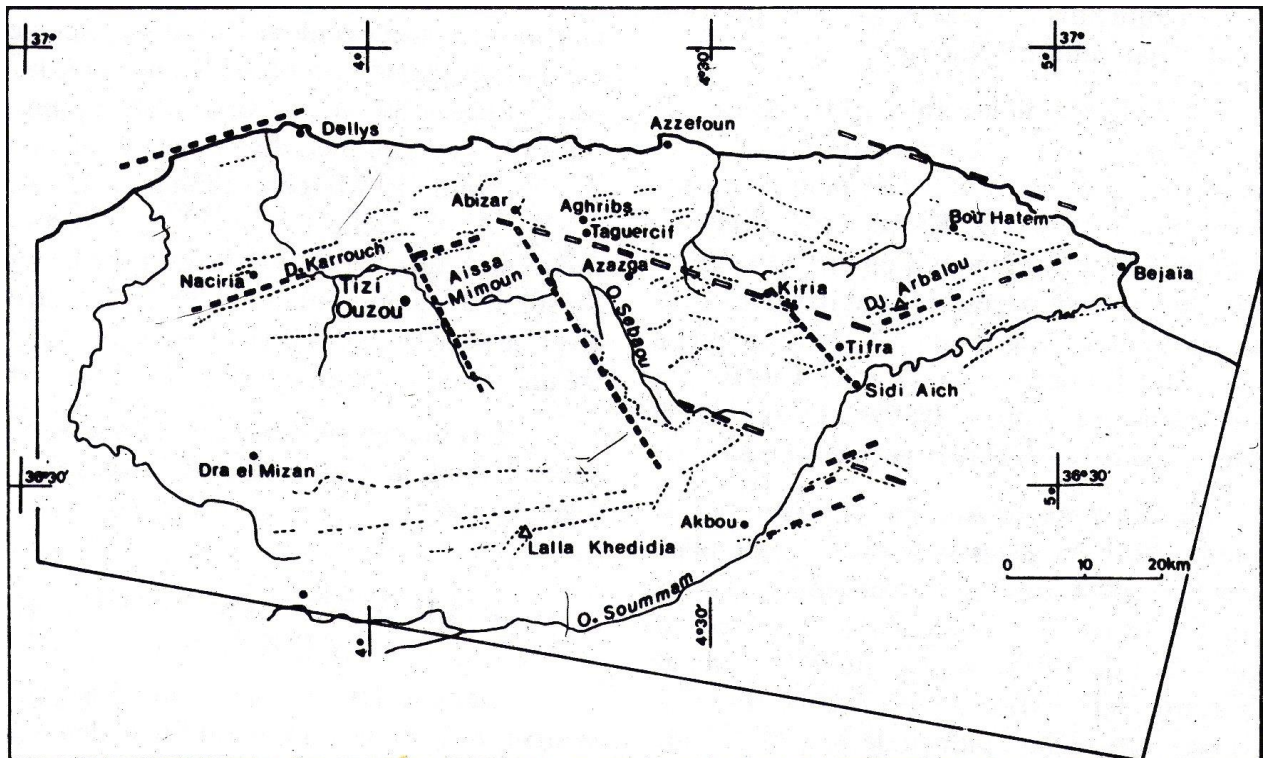


Figure 22: Interprétation schématique des principaux linéaments affectant la grande Kabylie (d'après l'image sat Land-SAT, n°09532-6-01)

Contexte climatique (HYDROCLIMATOLOGIE)

Dans le Djurdjura, le climat est montagnard à nuances méditerranéennes. Il est franchement montagnard au-dessus de 1400 mètres d'altitude avec plusieurs mois d'enneigement durant l'hiver.

Les précipitations

C'est l'ensemble des eaux météoriques qui tombent sur la surface de la terre, tant sous forme liquide (bruine, pluie, averse) que sous forme solide (neige, grésil, grêle) et les précipitations déposées ou occultes (rosée, gelée blanche, givre...). Elles sont provoquées par un changement de température ou de pression.

Le Djurdjura, en vue de sa position par rapport à la méditerranée, se trouve directement exposé aux vents humides et reçoit de ce fait, des précipitations d'une quantité relativement importantes, particulièrement sur le flanc Nord ce qui rend le Djurdjura parmi les régions les plus arrosées d'Algérie, avec une pluviométrie annuelle allant de 800 à 1500 mm en altitude, jusqu'à 2000 mm (certaines années) (Tas, 2018).

Ces précipitations sont généralement sous forme de pluie ou de neige. Le Djurdjura reçoit beaucoup de neige à l'extrémité orientale du massif central. (Belkadi, 2016).

Les précipitations sont réparties sur deux saisons :

-Une saison pluvieuse humide s'étalant du mois d'octobre au mois d'avril avec un maximum enregistré au mois de décembre.

-Une saison sèche s'étalant du mois de mai au mois de septembre.

Les principales périodes de précipitation sont comprises entre les mois de novembre jusqu'au mois de mai. Les sommets sont abondamment enneigés l'hiver. Toutefois, ces dernières décennies un déficit de l'ordre de 15% est observé (neige et précipitation). Les chutes de neige ont lieu à partir du mois de novembre ou décembre et persistent, selon les années, jusqu'au mois d'avril et quelque fois jusqu'au mois de mai (Amiri & Bekdouche, 2015).

Tableau 1: Moyennes mensuelles des précipitations pour la période 1984 – 1985 et 2018 - 2019

Précipitations mm	Sept	Oct	Nov	Déc	Janv	Fév	Mars	Avril	Mai	Juin	Juillet	Août	Annuel
Moyenne ONM	35.9	63.5	104.7	126.3	124.2	93.6	90.4	76.5	55.2	11.9	3.3	7.1	786.1
Min ONM	2.9	5.6	5.2	0	8.4	0	1.6	0	0.5	0	0	0	393.4
Max ONM	169.8	210.4	271.9	302.3	309	269.5	284.6	201.5	231.8	48.6	26.3	25.9	1267.6
Moyenne ANRH	33.2	66.3	106.5	129	124.2	104.7	87.5	78.4	53.7	11.1	3.6	7.8	800.6
Min ANRH	2.9	5.6	7.8	0	8.7	0.1	2.6	0.6	0.5	0	0	0	461.8
Max ANRH	153.1	241.7	227.2	302.3	316.2	316.7	258.6	204.5	231.1	48.6	25.4	51.6	1217.5
Pluie ANBT (2002/2019)	31.40	201.20	136.80	31.90	191.00	66.80	87.60	48.50	37.70	0.30	1.20	17.10	851.50

La neige

Présente chaque année sur le massif du Djurdjura et la Haute Kabylie, la neige couvre complètement les sommets entre 3 et 6 mois pendant la période allant de novembre à mai. Elle peut représenter jusqu'à 45 % des apports annuels. La nivrosité, part des précipitations tombées sous forme de neige en pourcentage représente 40% des précipitations à Tala Guilef et 21% AitOuabane entre novembre et avril et un tiers (32%) et 15 % sur l'année respectivement. (Tableau 2). Sur les sommets, au-dessus de l'isotherme 0°C à 1800m d'altitude, entre décembre et mars les précipitations sont toujours neigeuses (ABDESSELAM 1995 et inédit).

Les précipitations en forme de neige sont importantes car enfouies dans les névés elles constituent une ressource d'eau potable qui alimente les sources karstiques durant l'été à la période des basses eaux.

Tableau 2: Neiges en nombre de jours de chutes mensuelles et annuelles. (Kaci Moussa et Moali 2019)

Moyenne (1987/1992)	Oct	Nov	Dec	JAN	Fev	Mars	Avril	Mai	Annuel
Sommets du Djurdjura	0.4	5.4	10.4	11.3	9.8	7.2	4.8	0.9	50.2
Tala Guilef	0.3	3.7	6.3	7.3	6.7	4.5	2.8	0.2	31.8
Ain El Hammam	0.1	0.8	2.5	3.6	3.6	2.5	0.5	0.1	13.7
Larba Nath Irathen	0.0	0.2	1.8	2.8	2.5	0.8	0.3	0.1	9.2
Ait Ouabane	0.0	0.3	1.9	2.2	3.0	1.4	0.5	0.0	9.3
Ait Djemaa	0.0	0.2	0.8	0.8	1.3	0.8	0.3	0.0	4.3
Tizi Ouzou	0.0	0.0	0.0	0.1	0.2	0.0	0.0	0.0	0.3

Température

Le Djurdjura est caractérisé par une température moyenne interannuelle de 18.6 °C enregistré à Tizi-Ouzou.

Les mois les plus froids de l'année sont Décembre, Janvier et Février avec des températures moyennes de 11.8°C, 10.6°C et 10.5°C. Les températures maximales sont de 17.7°C, 16°C et 15.9°C tandis que les températures minimales sont de 8.1°C, 6.7°C et 6.6°C.

Les mois de Juillet et les mois d'Aout sont les deux mois les plus chauds de l'année. Leurs températures moyennes enregistrées sont 28.2 °C pour les mois de Juillet et 28.3°C pour les mois d'Aout avec des températures maximales de 35.9°C et de 34.9°C et des températures minimales de 21.3° et 22.2°. (Station de Tizi-Ouzou (2012-2019) (Agrouche, 2021) (ONM Tizi-Ouzou)).

Tableau 3: Températures moyennes mensuelles (°C) à la station ONM de T.O pour la période

Mois	Sept	Oct	Nov	Déc	Janv	Févr	Mars	Avr	Mai	Juin	Juil	Aout	Mov
T°C Max	31.05	26.8	20.5	17.1	15.75	16.9	19.12	22.15	27	32.2	36.6	35.6	25.1
T°C Min	19.02	15.4	10.85	7.92	6.7	7.42	8.8	11.2	13.8	18.1	21.7	22.3	13.6
T°C Moy	24.47	20.32	14.8	11.77	10.67	11.7	13.67	16.27	19.45	24.75	28.7	28.35	18.7

Humidité de l'air

L'humidité relative de l'air est une mesure de la vapeur d'eau dans l'air. Plus précisément, il s'agit de la quantité de vapeur d'eau présente dans l'air, exprimée en pourcentage (% HR) de la quantité nécessaire pour atteindre un niveau de saturation à la même température.

L'humidité relative moyenne de l'air est relativement faible à partir du mois de mai jusqu'au mois de septembre pour la période 2012-2019.

Le minimum atteint aux mois de juillet et Aout et de 56.2% et 57.7% (air extrêmement sec).

La période humide qui s'étend du mois d'octobre jusqu'au mois de Mai enregistre a maximum de 81.8% et 80.6% aux mois de Décembre et Janvier.

Tableau 4: Humidité de l'air à la station OMN de Tizi-Ouzou (2012-2019)

	Sep	Oct	Nov	Dec	Jan	Fev	Mars	Avril	Mail	Juin	Juillet	Aout
Humidité Min	38.7	42	52.9	58.7	56.6	53.9	49.6	47.6	44.2	35.7	30.2	31.7
Humidité Max	87.1	88.9	92.4	94.2	94.4	94.1	93.5	93.1	91.4	87.2	82.2	82.5
Humidité moy (%)	65.5	69.2	76.7	81.5	80.6	78.5	75.9	73.2	69.7	61.9	56.2	57.5

Le vent

Le Djurdjura constitue une barrière aux vents chauds. Son versant sud y est plus exposé tout comme aux rayons du soleil (Abdesselam, 1995). La force, fréquence et direction des vents dominant caractérise souvent une région. (Djemai, 1985).

Dans le cas du Djurdjura à son flanc sud, exposé aux vents et aux rayons du soleil comme cité précédemment, la neige font rapidement et ne tiendra pas jusqu'en été contrairement au flanc nord qui, formera un bon réservoir d'eau douce durant la période chaude.

Les vents généraux sont variables suivant les saisons. Les directions dominantes varient entre Ouest et Nord-Ouest à Tizi-Ouzou. En moyenne montagne, les directions Sud-Ouest et Est sont importantes.

Hydrochimie

L'analyse physico-chimique d'une centaine de points d'eau a montré que le faciès de la majorité de ces eaux est bicarbonaté-calcique ou chlorurées-calciques a sodiques par endroits (ANRH, 1995)

Les eaux chlorurées sodique (*Source Tinzert 95.4mg/l de Na en hiver*), parfois chargées de magnésium sont d'origine météorique, générées à partir de l'évaporation des eaux de la méditerranée s'infiltrant rapidement dans les formations calcaro-dolomitiques très perméable et réapparaissant au niveau des sources sans s'enrichir en éléments chimiques majeurs des roches encaissantes de manière considérable.

En présence de CO₂ libre, ces eaux deviennent bicarbonatées calciques ou magnésiennes, par suite de lessivage des formations carbonatées.

Tableau 5: Qualité chimique des cours d'eau (ANRH H. MANCER.1995).

station	PH	Cond. S/cm	HCO ₃ mg/l	Cl mg/l	SO ₄ mg/l	NO ₃ mg/l	Ca mg/l	Mg mg/l	Na mg/l	K mg/l	R.sec mg/l
Norme max AEP		1250		200	250	50		50	100	12	600
Assif Boghni	8.1	1185	213	257	72	4.0	71	32	136	7.0	830
Ain Zaouia	8.3	702	273	73	92	8.4	65	38	49	5.7	563
Bou Nouh	8.2	450	236	30	34	3.0	70	11	23	1.0	350
Assif Aissi	8.1	456	211	36	57	4.2	57	24	19	3.0	370
Tilesdit	7.8	618	228	65	49		62	24	37	2.4	394

7. Quelques schémas des formes karstiques les plus importantes du Djurdjura (Quinif 1978).

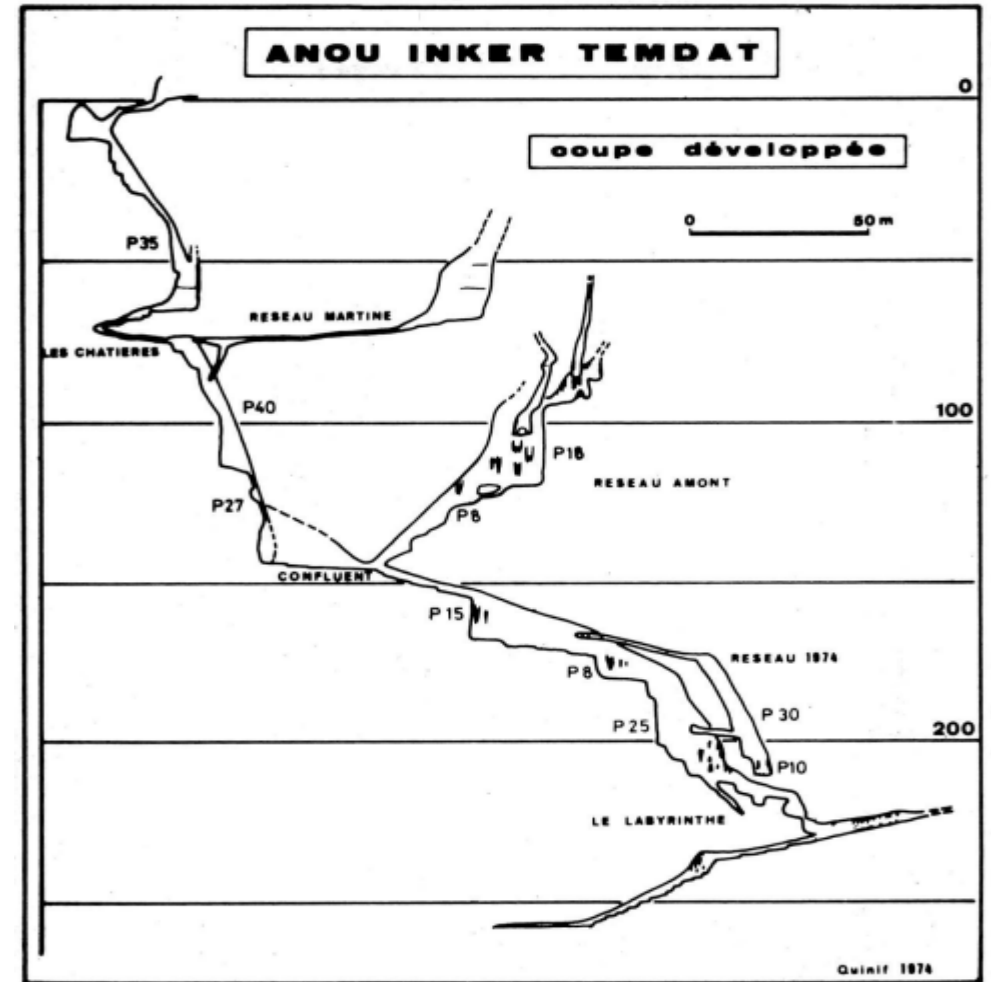
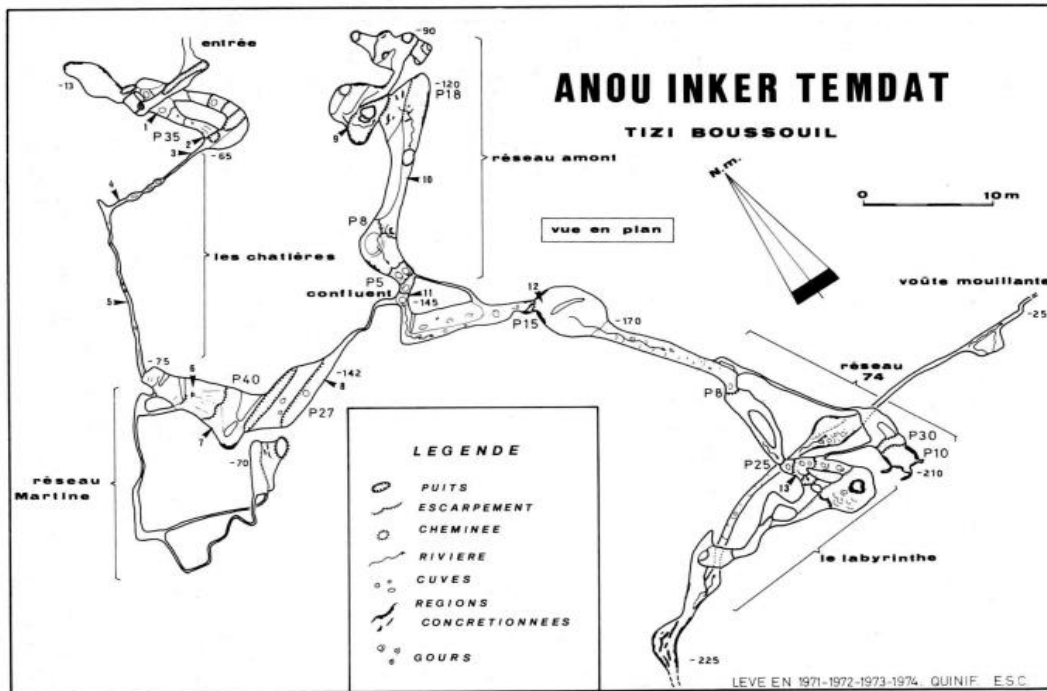


Figure 23: Coupe d'Anou Inker Temdat.

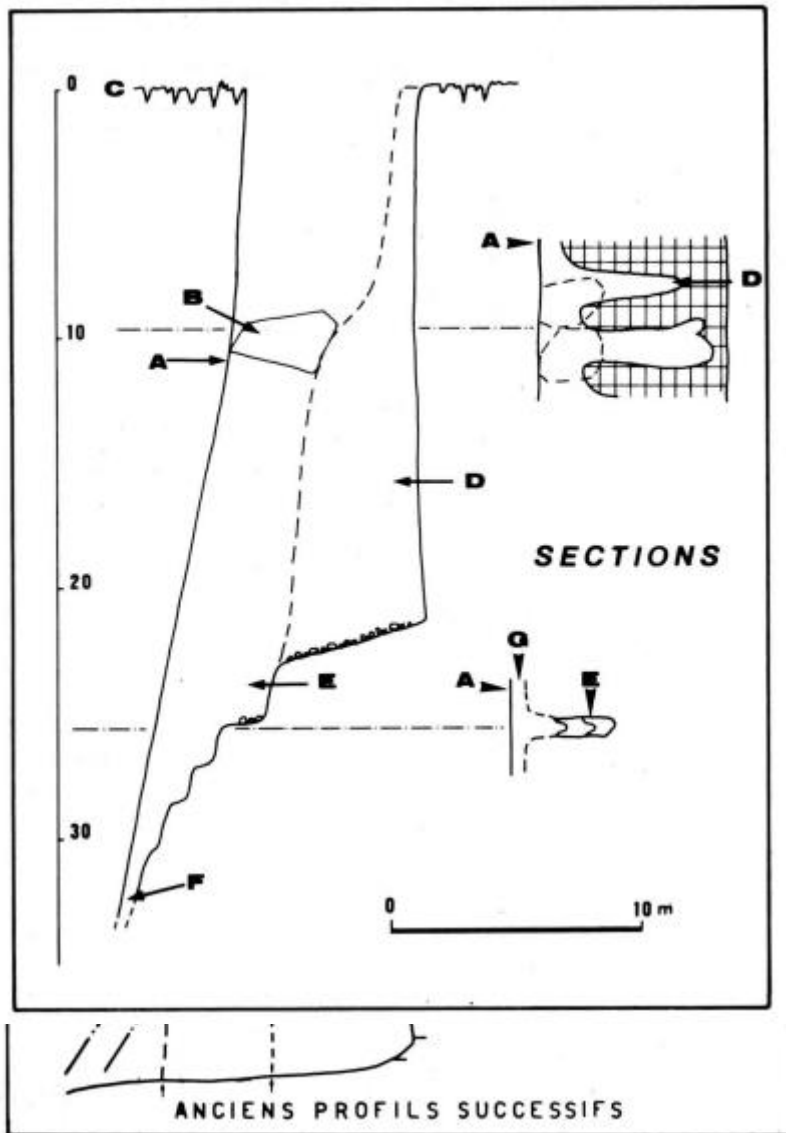


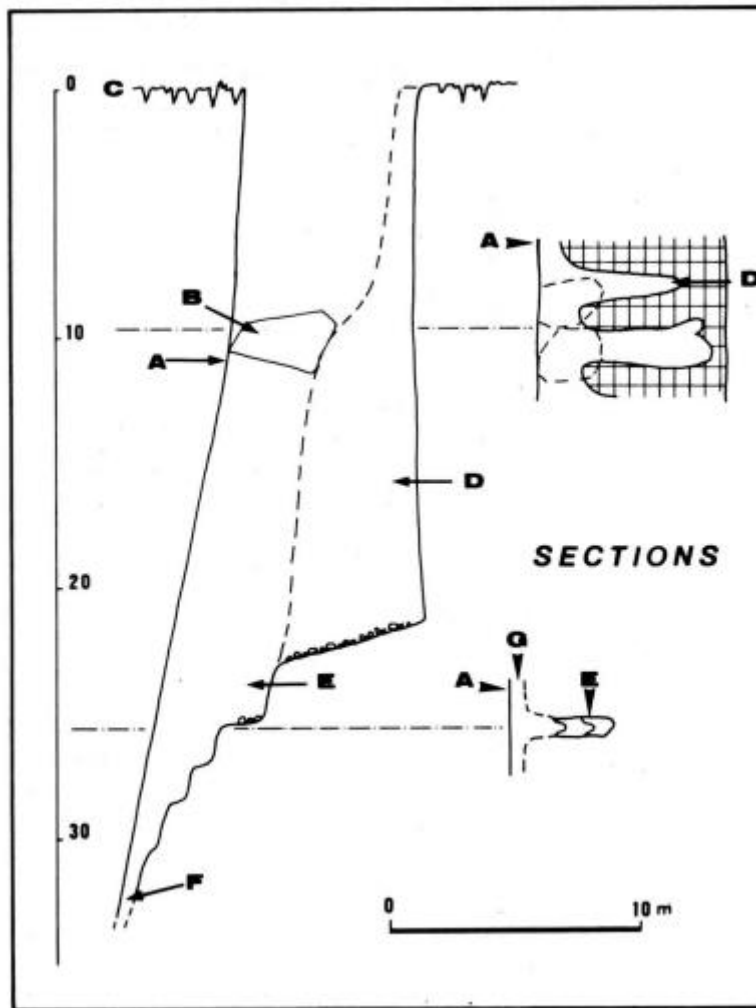
Figure 24: Coupe de la structure et évolution de Anou Inker Temdat.

Coupe au travers d'un puits type de l'Inker Temdat.

Ce puits se développe suivant deux plans de stratification.

On a indiqué les profils successifs d'écoulement. L'eau suit d'abord les plans de stratification pour s'en affranchir plus tard en écoulement cascasant avec formation de cuves.

Le bas du puits prend un profil en éteignoir, ce dernier remontant progressivement vers le sommet du puits. Dans cette évolution, la voute (partie supérieure de la chambre souterraine) est à peine touchée par l'érosion.



Légende :

A-Paroi frontale surplombante.
(C'est le mur inverse de la faille qui est à peine touchée par la corrosion.

B-Bloc coincé.

C-Surface lapiazée.

D-Grande cannelure entaillant la paroi « normale ».

E-Méandre entrecoupé de murs de cascade, prolongeant la cannelure aérienne.

F-Endroit où le méandre devient impénétrable.

G-Elargissement creusé au détriment de la faille.

Figure 25: Coupe dans le grand bogaz du lapiaz de la Terga.

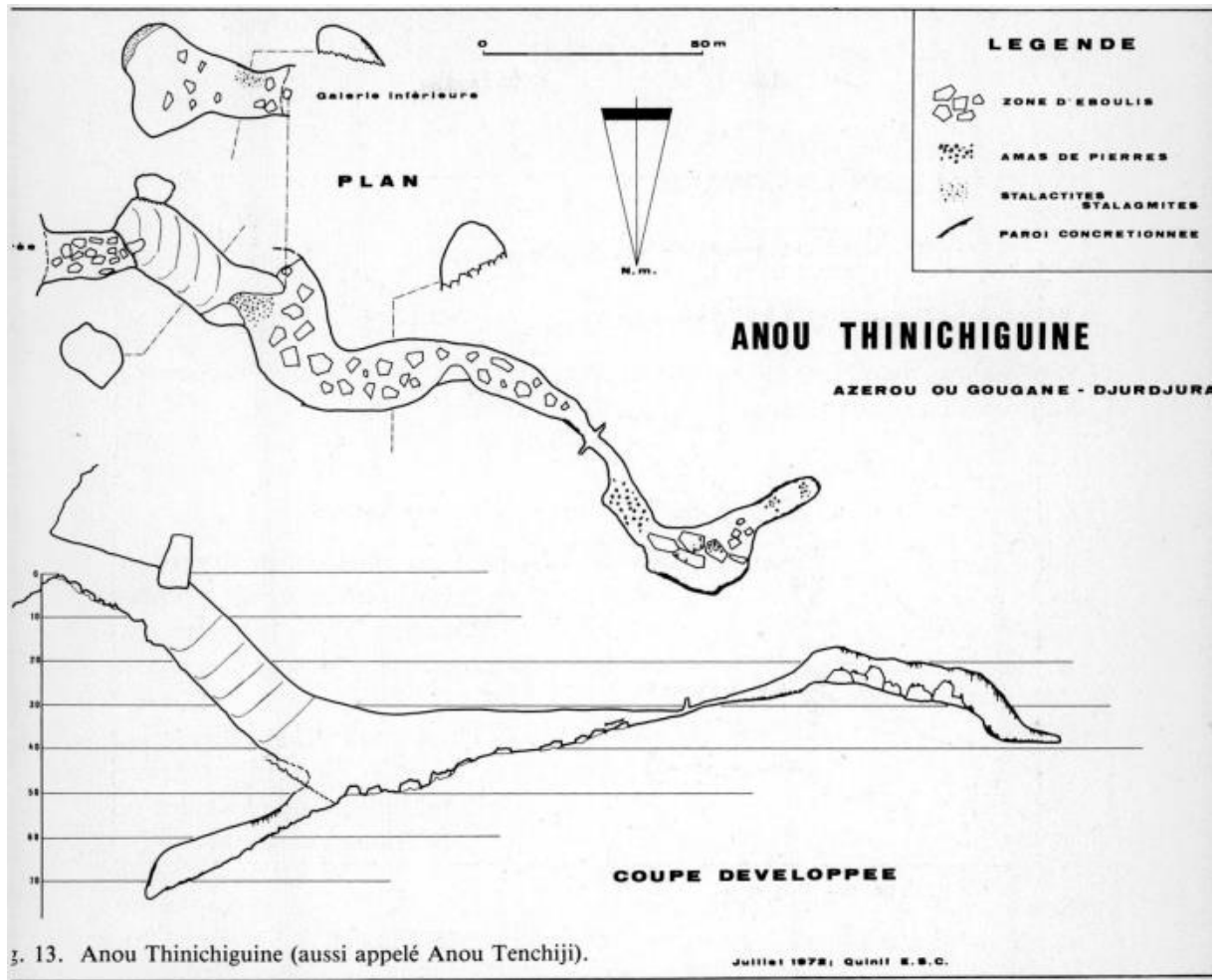
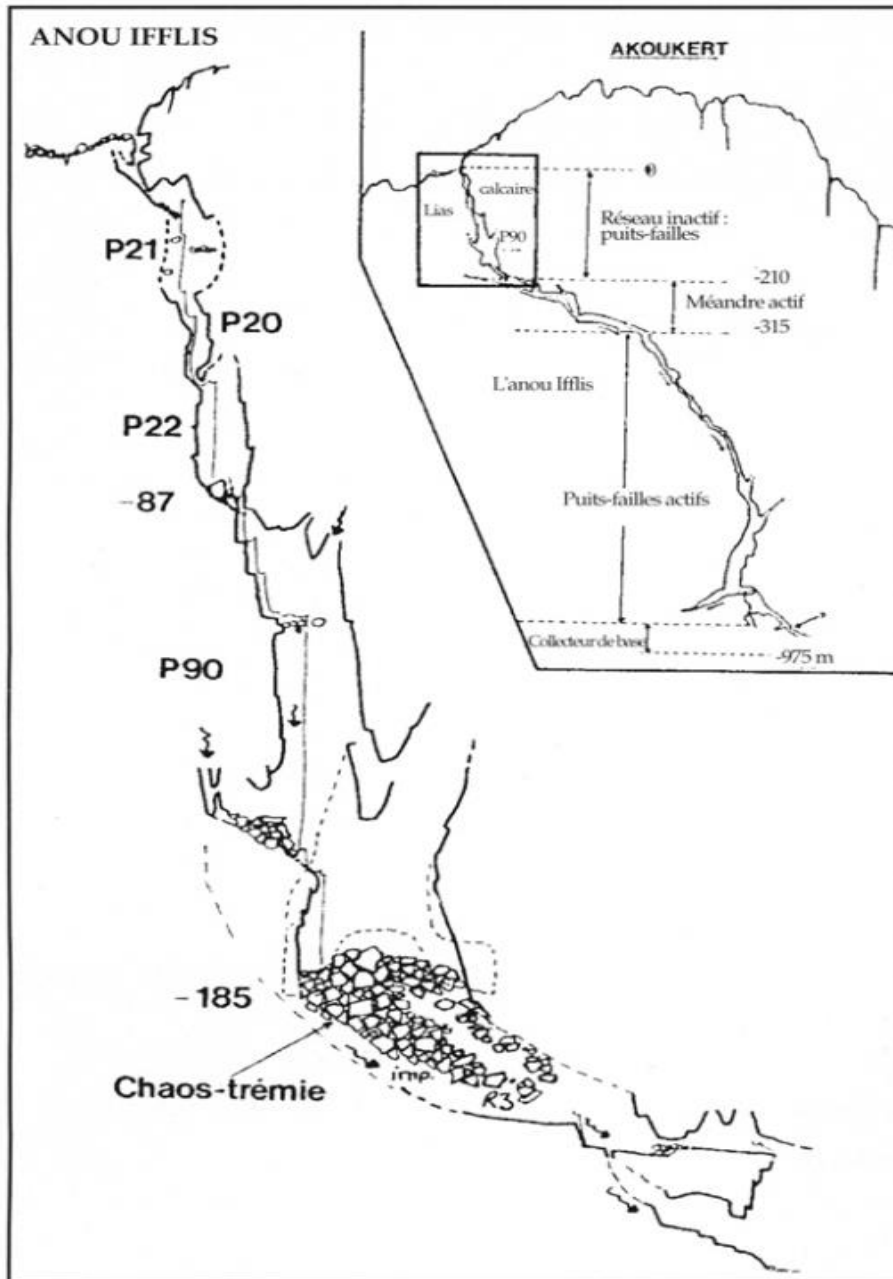


Figure 26: Coupe d'Anou Thinichigine appelé aussi Anou Tenchiji.



La cavité se développe sur de grandes fractures de décompression, dans l'étroit chaînon du Timédouine-Akoukert (Lias calcaire).

La base du puits de 90 m est formée par un épais chaos de blocs provenant de l'effondrement d'une paroi du puits.

Ifflis.

Figure 27:
Gouffre de l'Anou

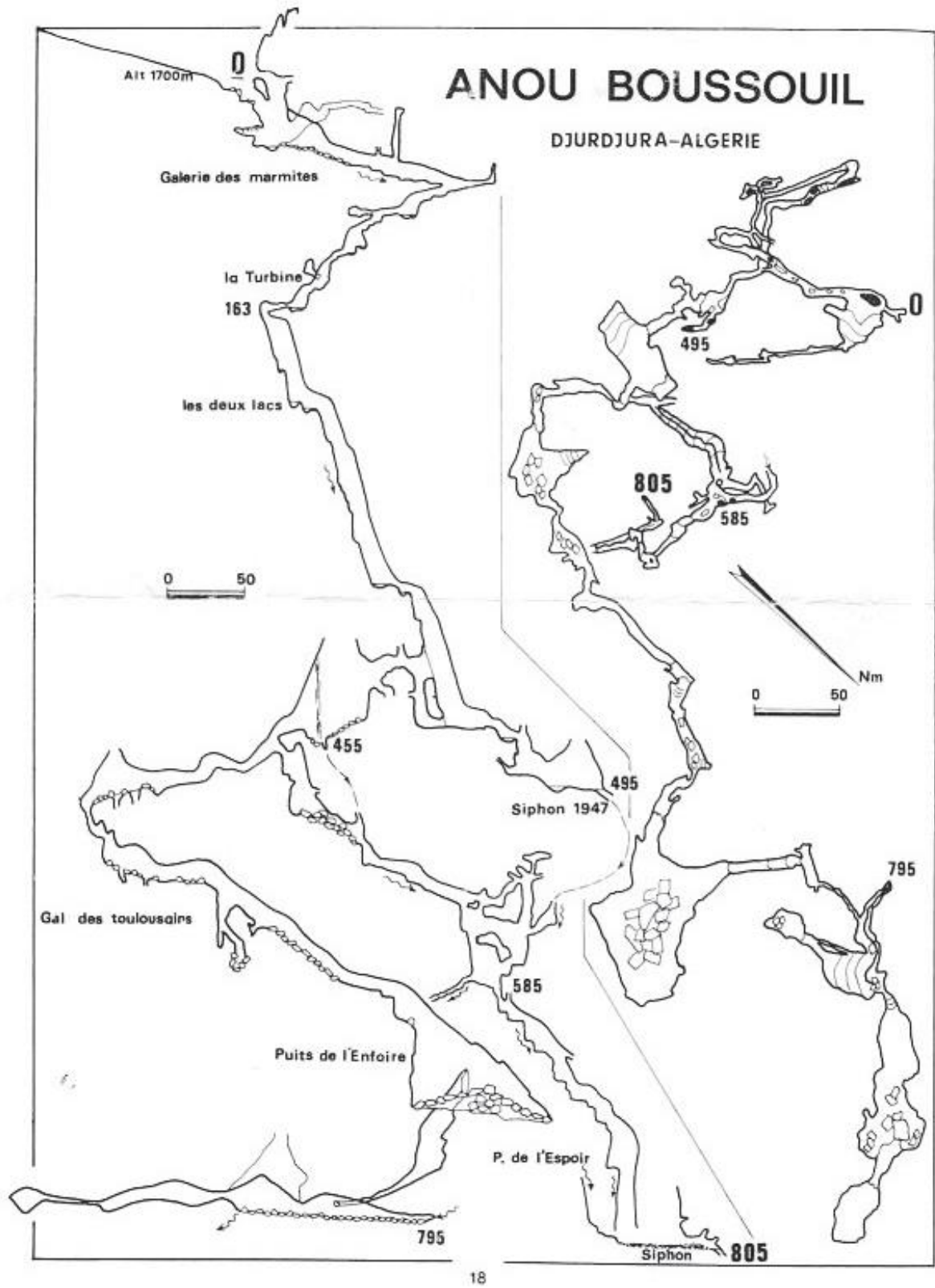
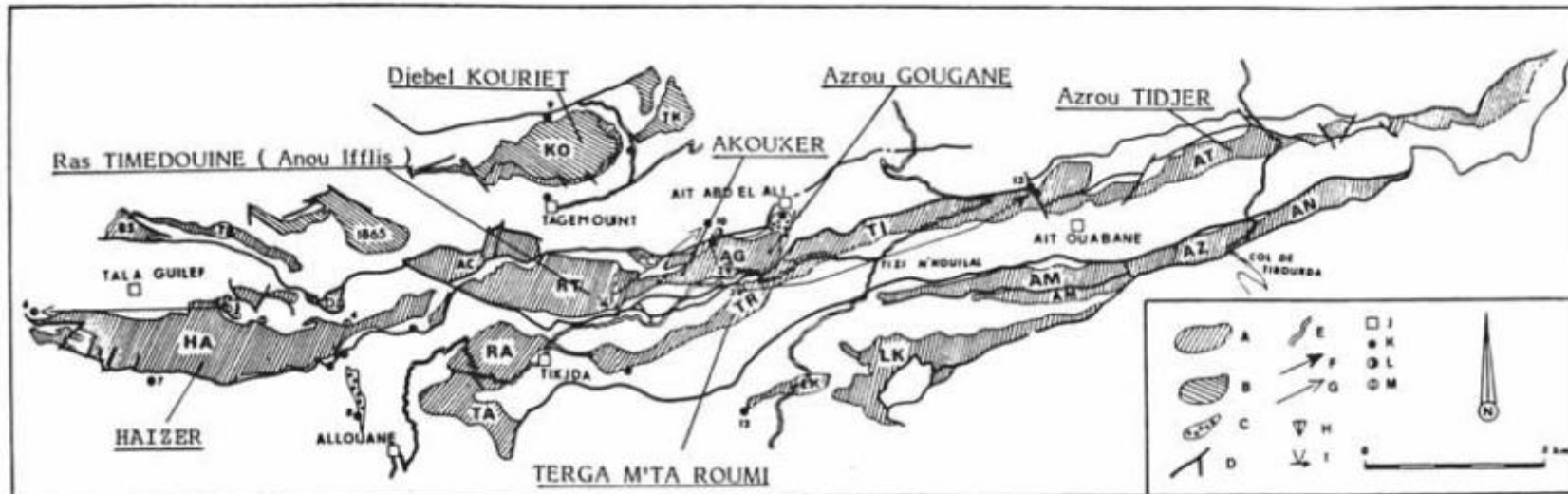


Figure 28: Coupe du Gouffre d'assouil (Anou Boussouil).

ESQUISSE HYDROGEOLOGIQUE DU DJURDJURA



A : Lias inférieur (calcaires et dolomies).
 B : Lutétien (calcaires nummulitiques).
 C : Eboulis calcaires consolidés et karstifiés.
 D : Faille, chevauchement.
 E : Route.
 F : Communication hydrologique prouvée par traçage.
 G : Communication supposée.

H : Gouffre-perte temporaire.
 I : Aven donnant sur une circulation pérenne.
 J : Agglomération.
 K : Source pérenne.
 L : Source temporaire.
 M : Perte temporaire.

1. Anou Ifflis
 2. Anou Inker Temdat
 3. Anou Boussouil
 4. Perte du lac Goulmine
 5. Ponor des poljés de l'Haizer
 6. Aïn Tinzert
 7. Source de Merkala
 8. Aïn Allouane
 9. Ansor Meskeï
 10. Ansor Arbailoune
 11. Tala Smedane
 12. Aïn Aberkane
 13. Tala El Hammam Boudrar

d'après "Djurdjura", Spéléologie Algérienne, n°4, 1985-86-87, page 70

Figure 29: Esquisse hydrogéologique du Djurdjura d'après "Djurdjura", Spéléologie Algérienne, n°4, 1985-86-87, page 70.

Conclusion

Le Djurdjura est formé par plusieurs unités structurales sous forme d'écaillés redressées à la verticale.

Les calcaires qui les forment se présentent sous forme de barres fracturées et karstifiées.

Les formes de surface sont des lapiaz, des champs de dolines, des dolines-puits et de long couloirs (Agouni) qui évoluent vers des formes souterraines donnant des gouffres de plusieurs dizaines de mètres de profondeur. Ces formes karstiques ont subi un défonçage nivo-karstique donnant la topographie dolinaire très développée.

Les formes allongées sont parallèles à la direction générale de la chaîne.

Les dolines se situent à la même altitude que les lapiaz.

L'Agouni et les Tesserefts sont des formes caractéristiques du Djurdjura.

Les plateaux de Tachagalts sont des poljés où se localisent de nombreuses pertes sous le remplissage alluvial.

Les terrains tendres forment de profondes vallées entre les grandes masses calcaires.

La grande dépression de la fracturation tectonique, la densité des dolines ainsi que les fissures ouvertes par la décompression, augmentent la perméabilité en grand, donc la dispersion de l'infiltration des eaux.

Cependant, il manque une étude quantitative, une analyse structurale et statistiques des formes du Djurdjura pour une description plus exhaustive.

Chapitre 3 : Méthodologie

1. Introduction

Les données spatiales ainsi que de bonnes bases de données géographiques sont d'une grande importance dans le domaine des géosciences et sont indispensables pour la justesse et la fiabilité des études. Grâce aux avancées technologiques, l'acquisition des données se fait également par voie numérisée ce qui n'empêche guère les sorties *in situ* pour une meilleure appropriation de l'espace et une vérification « traditionnelle » de certaines données et/ou résultats d'analyse.

Les systèmes d'information géographique, appelé plus communément SIG sont considérés comme une des technologies de l'information les plus performantes.

Ces derniers intègrent progressivement l'héritage de la production cartographique classique et sont souvent décrits comme des outils de cartographie assistée par ordinateur. Ils reposent nécessairement sur la technologie informatique et sont parfois assimilés à des ordinateurs spécialisés, à leurs périphériques et à leurs données.

Plus simplement, un SIG est : "Un système pour collecter, stocker, vérifier, manipuler, analyser et restituer des données spatialement référencées à la surface de la Terre"

2. Notion de Systèmes d'Information Géographique

Qu'est-ce qu'un SIG ?

La multiplication des approches de constitution et de traitement de l'information géographique s'accompagne d'un foisonnement d'outils capables de la structurer et de la traiter, ils sont regroupés, pour des raisons de commodités, sous le vocable SIG (Système d'Information Géographique).

Les SIG gèrent des données vectorielles et matricielles. D'une manière générale, les données vectorielles peuvent être des points (0D), des lignes (1D), des polygones (2D) ou des volumes (3D).

De nos jours, 80 % des données numériques possèdent une dimension géographique. Une donnée (data) dotée d'une référence spatiale (géodata), l'information géographique est récoltée, stockée, traitée, analysée puis transformée pour de multiples usages.

De ce fait, on peut dire qu'un système d'information géographique est aussi un système de gestion de base de données pour la saisie, le stockage, l'extraction, l'interrogation, l'analyse et l'affichage de données localisées. C'est un ensemble de données repérées dans l'espace, structuré de façon à pouvoir en extraire commodément des synthèses utiles à la décision.

Autres définitions

Le SIG est un système informatique permettant à partir de diverses sources, de rassembler et organiser, de gérer, d'analyser et de combiner, d'élaborer et de présenter des informations localisées géographiquement contribuant notamment à la gestion de l'espace.

Un système d'information géographique est un ensemble d'équipements informatiques, de logiciels et de méthodologies pour la saisie, la validation, le stockage et l'exploitation de données, dont la majorité est spatialement référencée, destinée à la simulation de comportement d'un phénomène naturel, à la gestion et l'aide à la décision.

L'information géographique : une représentation liée à une position géographique d'un objet ou d'un phénomène à un moment donné.

Une donnée : est un ensemble de valeurs ou de faits récoltés et utilisés pour atteindre des objectifs voulus. Une donnée est dite « géographique » lorsqu'elle fait référence à un ou plusieurs objets localisés à la surface de la Terre. Ses coordonnées sont définies par un système géodésique (ou système de référence spatiale).

Alors qu'une information est l'ensemble des données traitées et interprétées pour en tirer une signification dans un objectif d'aide à la décision

Les composant d'un SIG

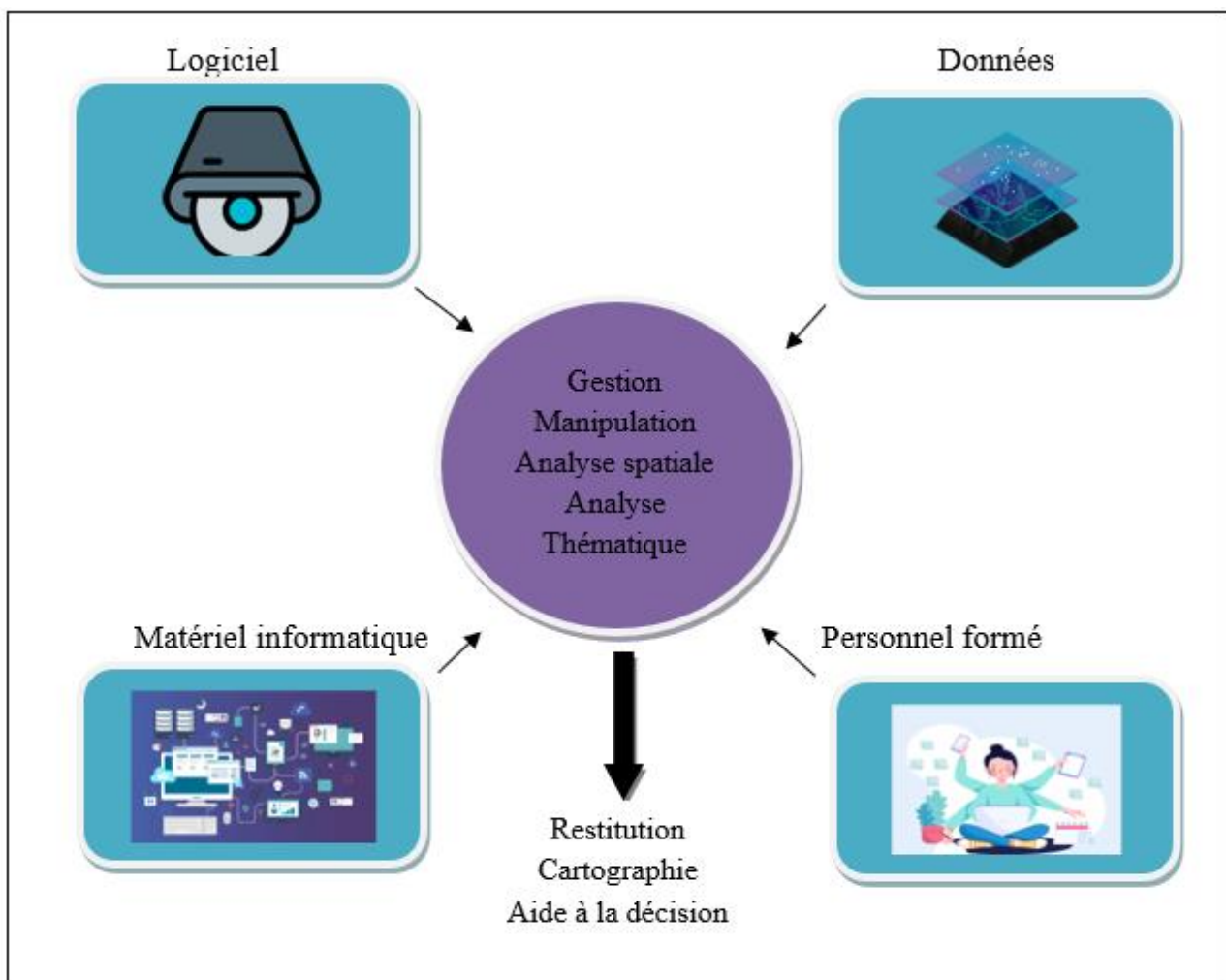


Figure 30: Les composant d'un SIG

Mode de présentation des données géographiques

La présentation des objets géographiques dans un SIG peut se faire selon deux modes : le mode raster et le mode vecteur (Figure 34).

Les critères de choix de la structure à utiliser sont directement reliés à la quantité d'informations à gérer, à la résolution désirée ainsi qu'aux analyses à effectuer (Ghabeche, 2011).

- Le mode Raster (Matriciel)

Le mode raster ou mosaïque correspondant à la division régulière de l'espace sous forme cellule (Pixel) ou carrées.

- Le mode Vecteur

Un système basé sur le mode vectoriel affiche les données graphiques comme étant des points, des lignes, des courbes ou des surfaces (aires) avec des attributs.

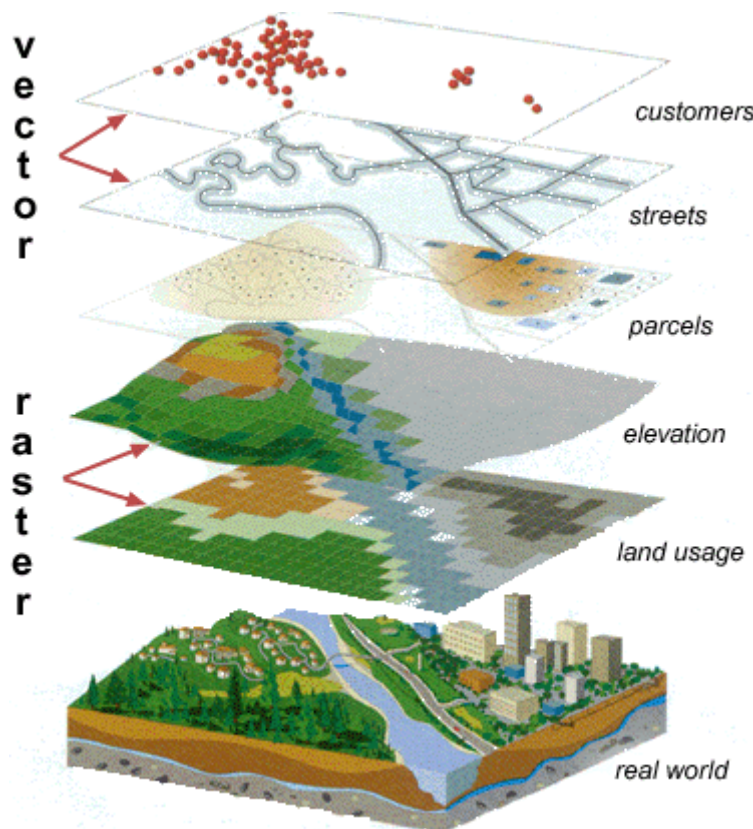


Figure 31 : Mode de présentation géographique dans un SIG

3. Les principales fonctions d'un SIG

Les fonctionnalités de base d'un SIG, d'après le leader mondial du marché des logiciels SIG : ESRI, permettront de :

- Cartographier et visualiser : en comprenant les localisations et les relations spatiales avec des cartes et des représentations visuelles.
- Gérer : recueillir, organiser et maintenir une description précise et géographique des biens et ressources.
- Permettre la mobilité : gérer et équiper des collaborateurs nomades pour recueillir et accéder à de l'information sur terrain.
- Superviser : suivre, gérer et superviser des biens et ressources en temps réel.
- Analyser : découvrir, mesurer et prévoir les tendances et évolutions pour améliorer et optimiser.
- Concevoir et planifier : évaluer des solutions alternatives et imaginer les meilleurs projets.
- Décider : obtenir une parfaite connaissance de la situation et prendre des décisions basées sur l'information.
- Impliquer : communiquer et collaborer avec les citoyens et les communautés d'intérêt.

-Partager et collaborer : donner les moyens à chacun de facilement découvrir, utiliser, créer et partager de l'information géographique.

4. Les différents aspects d'un SIG

Un SIG doit proposer plusieurs volets pour afficher et manipuler les informations géographiques :

Une géodatabase (le catalogue) :

Un SIG correspond à une base de données spatiale contenant des jeux de données qui représentent des informations géographiques selon un modèle de données SIG génériques (entités, rasters, attributs, topologies, réseaux, etc.).

Une géovisualisation (la carte) :

Un SIG est un ensemble de cartes intelligentes (2D ou 3D) et de vues (2D ou 3D) qui montrent des entités spatiales et leurs relations à la surface de la Terre. Il est possible d'élaborer différentes vues cartographiques des informations géographiques sous-jacentes, qui s'utilisent comme des "fenêtres ouvertes sur la base de données géographique" afin d'effectuer des requêtes, des analyses et de modifier les informations géographiques.

Un géotraitement (la boîte à outils) :

Un SIG comprend des outils de transformation des informations qui produisent des informations à partir des jeux de données existants. Les fonctions de géotraitement partent des informations contenues dans les jeux de données existantes, appliquent des fonctions analytiques et écrivent les résultats dans de nouveaux jeux de données.

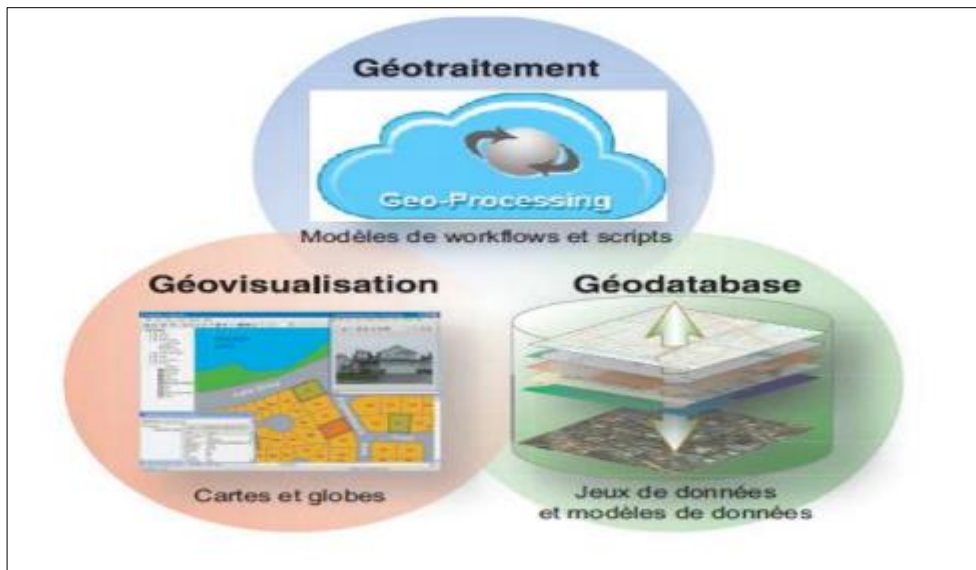


Figure 32: Les différents aspects d'un SIG.

Ensemble, ces trois éléments constituent le noyau d'un SIG complet.

Le logiciel SIG utilisé pour réaliser toutes les cartes de ce mémoire est le produit ESRI ArcGIS version 10.5 tandis que les photos aériennes proviennent du site *open source* USGS Earth Explorer.

5. Définition de ArcGIS

ArcGIS (10.X) est un logiciel SIG pour visualiser, gérer, créer et analyser des données géographiques. ArcGIS a été développé par la firme américaine ESRI (Environmental Systems Research Institute, Inc.).

6. NOTIONS DE BASE SUR LA TÉLÉDÉTECTION

Généralités sur la télédétection

Définition

La télédétection est la science et la technologie par lesquelles les caractéristiques physiques des objets d'intérêt peuvent être identifiées, mesurées et/ou analysées sans contact direct avec ceux-ci (Garba, 2012).

Principes de base de la télédétection

La télédétection est le fruit de l'interaction entre trois éléments fondamentaux (Figure 36).

- la source d'énergie : c'est l'élément qui "éclaire" la cible en émettant une onde électromagnétique (flux de photons). Elle peut être d'origine naturelle comme la lumière du soleil ou la chaleur de la terre transmise, ou d'origine artificielle, comme le rayonnement utilisé par certains types de radar.

- la cible : c'est l'objet de la surface terrestre observée par le satellite.
- le vecteur : c'est ce qu'on appelle aussi la plate-forme de la télédétection, il permet de mesurer le rayonnement électromagnétique réfléchi par la cible.

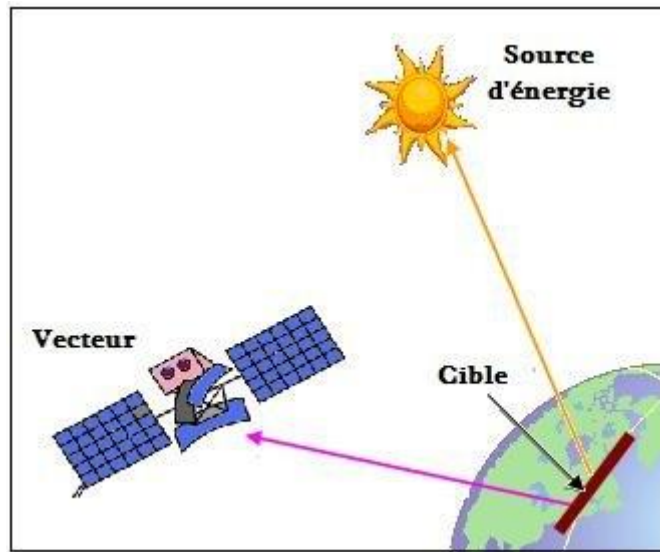


Figure 33: Les trois éléments fondamentaux de la télédétection

Rayonnement et spectre électromagnétique

Par définition, le rayonnement électromagnétique est une forme d'énergie omniprésente qui nous entoure partout, il revêt divers modèles tels que les ondes radio, les rayons X et rayons gamma, ainsi que la lumière du soleil (Coulibaly, 1996).

Le soleil est la source principale de rayonnement électromagnétique et sa lumière est la source d'éclairage planétaire qui permet entre autres, au cerveau de l'utiliser pour construire une image intégrée de ce qu'on voit.

En effet, la lumière visible représente une petite partie du spectre électromagnétique et contient une large gamme de longueurs d'ondes électromagnétiques. Il existe d'autres types de rayonnements qui ne sont pas visibles à l'œil nu (les rayonnements courtes micro-ondes, les ultraviolets, l'infrarouge, etc.) (Figure 37).

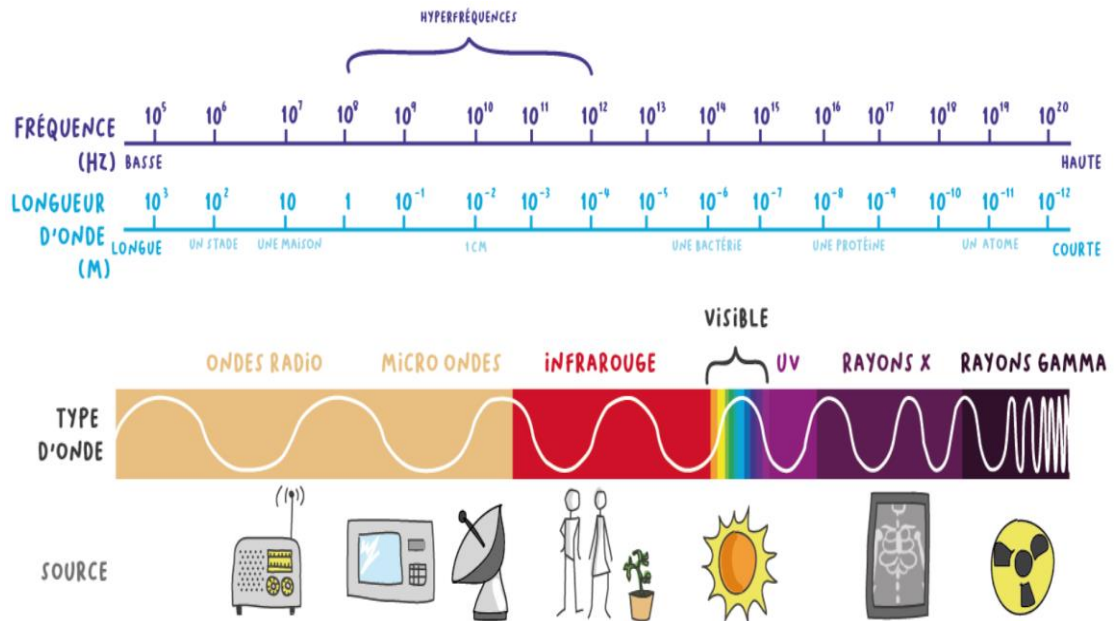


Figure 34: Spectre électromagnétique.

Signature spectrale

Au cours de la propagation d'une onde électromagnétique dans un milieu, les interactions avec la matière dépendront de la fréquence de celle-ci et de la nature de la matière. Par ailleurs, ces interactions se feront principalement par absorption résonante, suivie d'une réémission du rayonnement par les atomes du milieu.

La signature spectrale est donc la réponse d'un objet atteint par une énergie, c'est la carte d'identité de l'entité (Pebay-Peyroulay, 2012).

Par exemple, la quantité d'énergie réfléchiée par l'eau est faible par rapport aux plantes et au sol. Les plantes réfléchissent à 50 %, les sols entre 30 et 40 %, tandis que l'eau réfléchit environ 10 % (Figure 38).

Pratiquement, il est difficile que la signature spectrale soit la même dans toutes les régions et à toutes les saisons de l'année.

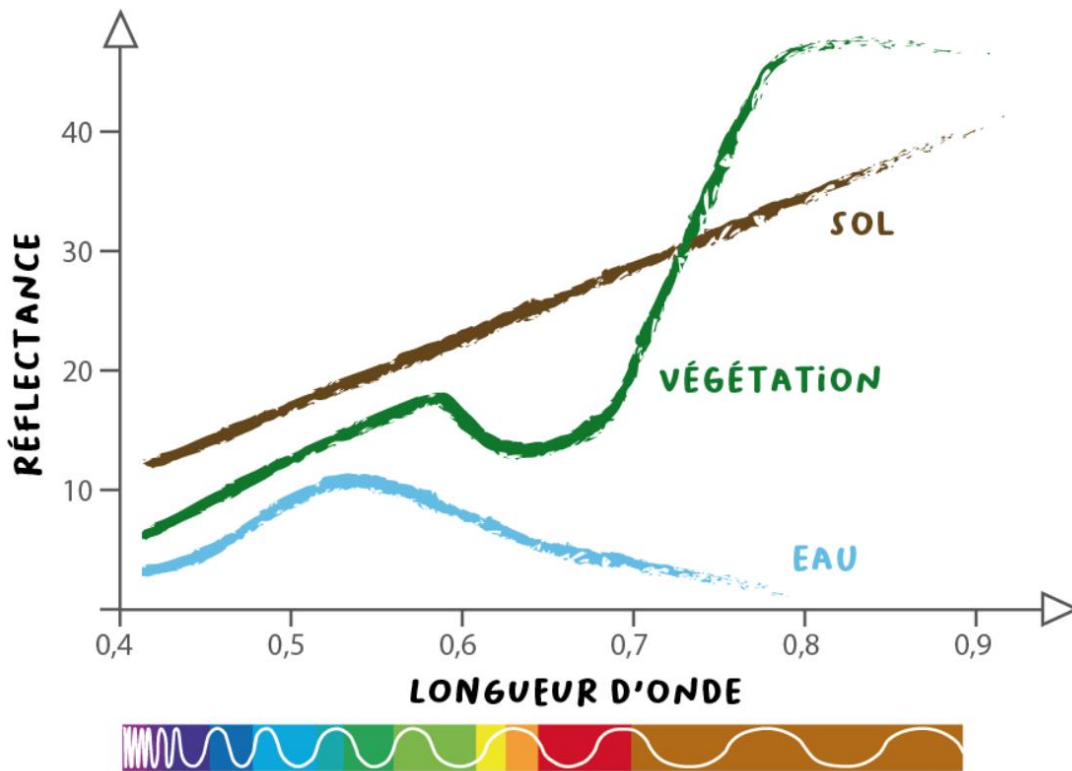


Figure 35: Signature spectrale de quelques éléments.

7. Processus de la télédétection

Le processus de la télédétection nécessite sept étapes (Figure 39) et sont énumérées de la manière suivante :

- Source d'énergie ou d'illumination (A) : la première exigence pour la télédétection est d'avoir une source d'énergie qui illumine ou fournit de l'énergie électromagnétique à la cible d'intérêt.
- Rayonnement et atmosphère (B) : lorsque l'énergie se déplace de sa source à la cible, elle entre en contact et interagit avec l'atmosphère qu'elle traverse. Cette interaction peut avoir lieu une deuxième fois lorsque l'énergie se déplace de la cible vers le capteur.
- Interaction avec la cible (C) : une fois que l'énergie parvient à la cible à travers l'atmosphère, elle interagit avec la cible en fonction des propriétés de la cible et du rayonnement.
- Enregistrement de l'énergie par le capteur (D) : un capteur est nécessaire (à distance, pas en contact avec la cible) pour collecter et enregistrer le rayonnement électromagnétique après que l'énergie a été diffusée ou émise par la cible.
- Transmission, réception et traitement (E) : l'énergie enregistrée par le capteur doit être transmise, souvent sous forme électronique, à une station de réception où les données sont traitées par un logiciel informatique en images (photographiques et / ou numériques).

-Interprétation et analyse (F) : l'image traitée est interprétée, visuellement et / ou numériquement ou électroniquement, pour extraire des informations que l'on désire obtenir sur la cible.

-Application (G) : le dernier élément du processus de télédétection est atteint lorsque nous appliquons les informations que nous avons pu extraire (les données) de l'imagerie sur la cible pour mieux comprendre, révéler de nouvelles informations ou aider à résoudre une problématique spécifique.

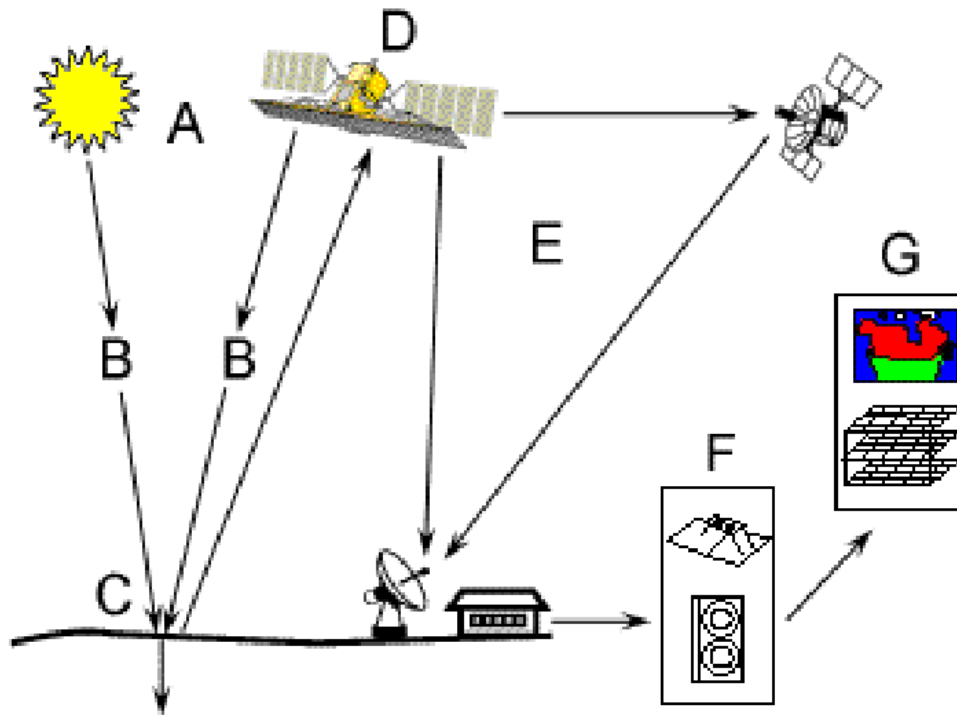


Figure 36: Etapes des processus de la télédétection

8. Application de la télédétection en géologie

La télédétection trouve son application dans différents domaines et à diverses fins et cela grâce à une combinaison des résolutions spectrales, spatiales et temporelles. Ces résolutions sont : la largeur de chaque bande enregistrée ; les détails perceptibles dans l'image et le laps de temps écoulé entre deux images.

La télédétection a une importance primordiale dans le domaine des Sciences de la terre, ses applications ne se limite pas à la cartographie uniquement mais au-delà. Elle a servi entres autres, à la prospection minière, pétrolière, hydrogéologique et est utilisée dans la surveillance des phénomènes naturels.

Tableau 6 : Exemples d'application de la télédétection dans différents domaines

<i>Domaines</i>	<i>Exemples d'applications</i>
Géosciences	Géologie, pédologie, géomorphologie...
Météorologie	Vitesses des vents, précipitations, températures, détection des cyclones, orages...
Océanographie	Couleur de l'eau, turbidité, hauteur des vagues, courant marin, phytoplancton, pollution marine...
Foresterie	Couverture forestière, santé des forêts, impacts après ouragans...
Cadastré /Urbanisme	Couverture du sol, urbanisation, contrôle des autorisations (piscines, zones bâties...)
Agriculture	Identification des plantations, évaluation de la production ...
Environnement	Etudes d'impact, détection des changements ...
Biologie / Ecologie	Classification des types de végétaux, étude du corail, cartographie des habitats ...
Télécommunication	Carte de répartition des antennes de téléphonie mobile...
Hydrologie	Comportements de l'eau à la surface du sol et dans le sol, cycle de l'eau...
Archéologie	Cartographie des sites archéologiques
Santé	Prévision des épidémies, relations avec les changements globaux ...
Humanitaire	Pré-alerte de famines : réfugiés (camps)...
Catastrophes environnementales	Feux de forêts, éruptions volcaniques, sécheresses, marées noires ...
Changements globaux	Désertification, variation climatiques, compositions de l'atmosphère...

9. Modèles Numériques de Terrain (MNT)

Les Modèles Numériques de Terrain (MNT), ou Digital Elevation Model (DEM), sont une cartographie de l'élévation du sol. C'est un ensemble de relevés d'altitudes suivant les points d'une grille.

Les MNT sont intéressants dans le cadre notre étude puisqu'ils sont une représentation de la topographie uniquement sans prendre en considération les éléments au-dessus de la surface dont la végétation, le bâti etc.

10. Méthodologie de travail

Pour élaborer les cartes de fracturation, courbure, pente, densité de drainage, exposition et la carte géologique de la zone d'étude, nous avons téléchargé deux images satellitaires qui recouvrent le Djurdjura depuis le site USGS Earth Explorer. Nous avons ensuite, sous le logiciel ArcGIS 10.5, assemblé ces images avec la fonction « mosaïque ».

Pour la carte de fracturation l'option « *hillshade* » nous a permis d'obtenir un ombrage. En modifiant le positionnement du rayonnement solaire, nous pouvons d'ores et déjà apercevoir de potentielles fractures que nous allons pouvoir digitaliser.

L'ensemble de ces fractures va constituer la carte de fracturation.

On pourra grâce à cette dernière réaliser la carte de densité de drainage et la carte de densité de fracture en activant l'option « *Density Line* » précisant à chaque fois si on introduit les fractures dessinées précédemment pour avoir la carte de densité de fracture ou bien le réseau hydrographique réalisé préalablement pour avoir la carte de densité de drainage.

La carte des pentes a été réalisée avec l'option « *Slope* » et la carte d'exposition avec l'option « *Aspect* ». La carte de courbure sera réalisée grâce à l'option « *Curvature* ».

La carte d'occupation du sol quant à elle n'a pas été réalisée d'un MNT mais plutôt d'un landsat.

Après l'élaboration des cartes et grâce encore une fois à Arcgis 10.5 on peut appliquer la méthode de modélisation cartographique AHP

11. L'AHP (Analytic Hierarchy Process, analyse hiérarchique des procédés)

Cette méthode statistique proposée initialement par Thomas L. Saaty en 1980 est la plus simple des méthodes multicritères à mettre en place (Tacnet, 2010). Elle suit 4 étapes majeures.

1/ Décomposition du problème complexe en une structure hiérarchique :

Elle permet de décomposer un problème en critères et sous-critères de résolution (Chevallier, 2007) au sein d'une structure hiérarchique (Lehoux et Vallée, 2004) qui peut prendre la forme d'un arbre de pondération (Bertrand, 2009).

Les critères choisis dans ce travail sont classés de haut en bas par leurs degrés d'importance :

La lithologie (géologie) : c'est le critère le plus important de tous. La nature lithologique d'un réservoir est le critère de base pour pouvoir juger ses potentialités

Les linéaments : la fracturation est un critère très important car il a la capacité à transformer une roche de perméabilité proche du 0% (inférieur à 1%) comme les calcaires massifs à des roches perméables comme les calcaires fissurés ou les karsts.

Drainage et Pente : ont leur importance attribuée la même importance car une pente douce favorise l'infiltration et donc l'alimentation des aquifères tandis qu'une pente forte favorise le drainage et la concentration des eaux.

Occupation du sol : un sol nu n'a pas le même rendu qu'un sol couvert. Par exemple un couvert végétal dense, permet grâce à ses feuilles d'amortir les fortes précipitations et favorise l'infiltration.

Exposition des versant : la fente et l'évapotranspiration se fait d'une manière plus rapide dans un versant exposé au soleil et aux vents.

Curvature : les curvature peuvent être d'important piège à neige et participeront à l'alimentation des sources au cours des périodes chaudes.

Pluie : l'intensité ainsi que la quantité de pluie favorise ou non l'infiltration.

2/ Effectuer des comparaisons binaires (matrice non normalisée)

Les critères (et sous-critères) sont comparés deux à deux pour évaluer la dominance de chacun par rapport aux autres (Chevallier, 2007 ; Bertrand, 2009). Pour cela, est utilisée l'échelle de comparaison ci-contre (tableau 5). Les calculs se font à tous les niveaux de l'arbre. La somme des poids d'un niveau doit être égale au poids du critère ou sous-critère d'ordre supérieur (Bertrand, 2009).

La méthode AHP passe par une conversion ordinale à une attribution d'un facteur de pondération aux critères qui est le poids de chaque critère.

Tableau 7: Echelle de comparaison des critères.

Echelle numérique ou intensité	Définition	Commentaire
1	Importance égale des deux critères : Également important	Les deux éléments concurrents de la même manière à l'objectif
3	Un critère est un peu plus important que l'autre : Légèrement plus important	L'expérience et le jugement personnel favorisent légèrement un élément par rapport à l'autre.
5	Le critère est plus important que l'autre : Fortement important	L'expérience et le jugement personnel favorisent vraiment un élément par rapport à l'autre.
7	Le critère est beaucoup plus important que l'autre : Très fortement plus important	Un élément est largement dominant et cette dominance est démontrée dans la pratique
9	Le critère est absolument plus important que l'autre Absolument plus important	La dominance d'un élément par rapport à un autre est démontré et absolue

3/ Détermination et synthétisation des priorités (matrice normalisée)

Ensuite, l'analyste calcule l'importance relative de chacun des éléments de la hiérarchie à partir des évaluations obtenues à l'étape précédente. Une matrice normalisée est mise en place, en divisant chacune des évaluations de l'étape 2 par la somme des évaluations de chaque critère.

4/ Cohérence des jugements

Il est important de vérifier que les jugements émis sont cohérents. Pour cela, un indice de cohérence noté IC est calculé

$$IC = (\lambda_{max} - K)(K - 1)$$

Avec :

- K : le nombre d'éléments comparés
- λ_{max} : somme des valeurs des vecteurs propres de la matrice normalisée sur le nombre de critères

Un IC faible signifie une bonne cohérence des jugements. Un IC fort signifie qu'une trop forte dominance a été accordée à un critère par rapport à un autre et donc que les jugements ne sont pas cohérents.

Cet indice est ensuite comparé aux valeurs critiques obtenues par simulation, correspondant à l'indice aléatoire d'une matrice de même dimension. Cette comparaison est effectuée par le calcul d'un ratio de cohérence, qui peut être interprété comme la probabilité que la matrice soit complétée de manière aléatoire. Il doit être inférieur à 10% sinon les jugements doivent être révisés (Bertrand, 2009)

$$RC = \frac{IC}{IA}$$

Avec :

- RC : Ratio de cohérence
- IA : Indice aléatoire
- IC : Indice de cohérence

Si le ratio de cohérence est inférieur à 10% alors la cohérence des jugements est bonne et les poids sont cohérents. A ce moment-là, les poids peuvent être appliqués aux jeux de données raster par le biais d'une somme pondérée.

Conclusion

La modélisation AHP associée aux SIG et à la télédétection est une approche avancée et efficace pour évaluer les potentialités des ressources en eau. Elle aide à la prise de décisions basées sur les données quantitatives et spatiales.

Les SIG et la télédétection permettent de recueillir des données géospatiales pertinentes. Les SIG sont utilisés pour créer des cartes thématiques qui représentent les potentialités en eau de la région. Ces cartes peuvent montrer les zones qui sont les plus favorables à l'approvisionnement en eau potable. L'utilisation de l'AHP permet de hiérarchiser et de pondérer les critères pertinents pour l'évaluation des potentialités en eau.

Chapitre 4 : Analyse hiérarchique de procédés

Introduction

L'analyse multicritère suivant la méthode AHP est un outil performant, qui permet de prendre une décision sur la base de la mise en relation de plusieurs critères. Cette méthode repose sur un découpage du processus de décision en une structure hiérarchique et la comparaison binaire de l'importance relative de critères en référence à l'aptitude pour un objectif global.

Les différentes étapes de la méthode de l'analyse multicritères sont résumées dans la figure suivante

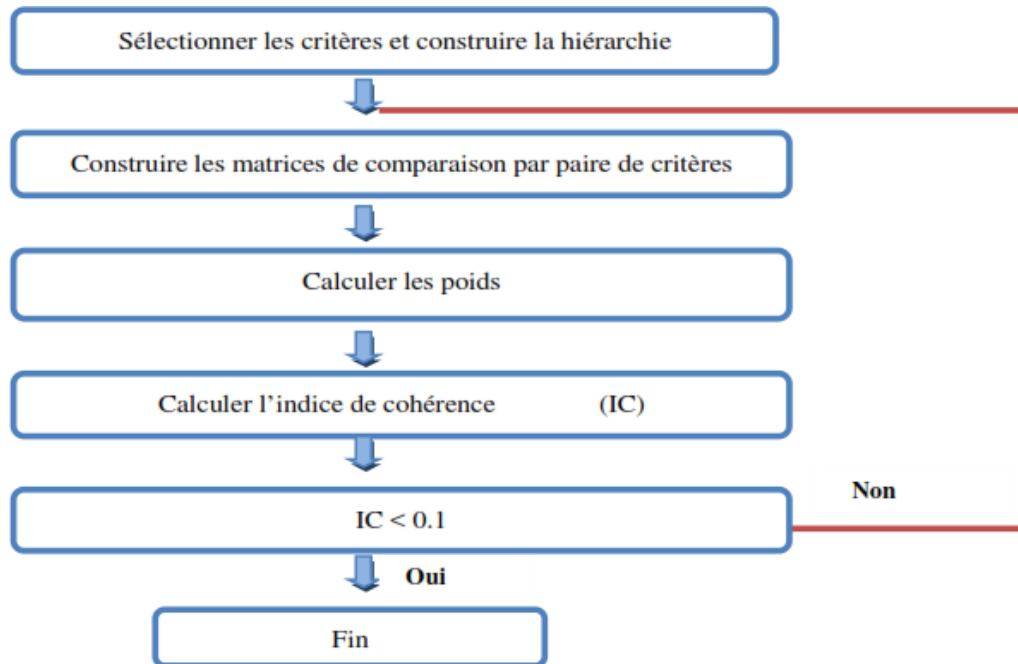


Figure 37: différentes étapes de la méthode de l'analyse multicritères.

- La première étape de modélisation par la méthode AHP consiste donc à analyser le problème afin d'identifier les divers aspects et caractéristiques susceptibles de participer à sa résolution. Une fois définis, ces éléments seront organisés en niveaux homogènes selon le principe de construction hiérarchique.

- La seconde étape de la méthode AHP consiste à évaluer les priorités à partir du jugement d'experts. L'évaluation des priorités repose sur un processus de comparaisons par paire. Les critères de même niveau sont comparés deux à deux relativement au critère père de niveau supérieur. Les comparaisons par paires sont alors analysées pour calculer l'Importance Relative des Critères (IRC) également appelée "poids". La somme des IRC doit être égale à 1 pour chaque critère. L'IRC prend par conséquent, la forme du vecteur propre W de la matrice telle que :

$W = (w_1, w_2, \dots, w_n)$ où w_i représente l'importance relative d'un critère donné par rapport à sa famille d'appartenance.

Le vecteur W peut être obtenu en calculant la moyenne de chaque colonne de la matrice M normalisée où chaque élément est divisé par la somme des éléments de la même colonne

Soit M' la matrice de comparaisons normalisée issue de M et telle que:

$$m'_{i,j} = \left(\sum_{k=1}^n m_{k,j} \right)^{-1} * m_{i,j}$$

Avec $i, j, k = 1, \dots, n$

Alors le vecteur d'importances relatives W est tel que:

$$w_i = \frac{1}{n} * \sum m'_{i,j}$$

Avec $i, j = 1, \dots, n$

Une fois les poids sont calculés, la cohérence des jugements doit être calculée afin de valider les priorités obtenues. Les situations de cohérence parfaite sont rares. Ainsi, la méthode AHP propose de calculer un Indice de Cohérence (ou IC) qui indique la probabilité que les estimations ont été aléatoirement assignées.

Les valeurs de IC inférieures à 0.10 indiquent la bonne cohérence, alors que quand les valeurs de IC dépassent 0,10, la matrice des pondérations doit être réévaluée. L'indice de cohérence est calculé moyennant la formule suivante:

$$IC = \frac{\lambda_{max} - n}{n - 1}$$

λ_{max} est la valeur propre maximale de la matrice. Une méthode simple pour estimer λ est considérer.

$$W' = M * W = (w_i) \text{ alors } \lambda_{max} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{w'_i}{w_i}$$

Avec $i = 1, \dots, n$

Application de la méthode AHP

Le choix des critères se résume dans le tableau suivant :

Tableau 8: Critères choisis pour l'application de l'AHP

	Lithologie	Linéaments	Drainage	Pente	Occupation	Exposition	Curvature	Pluie
Lithologie	1	2	3	3	5	7	8	9
Linéaments	0,5	1	2	2	3	5	7	8
Drainage	0,333333333	0,5	1	1	2	3	5	7
Pente	0,333333333	0,5	1	1	2	3	5	7
Occupation	0,2	0,333333333	0,5	0,5	1	2	3	5
Exposition	0,142857143	0,2	0,333333333	0,333333333	0,5	1	2	3
Curvature	0,125	0,14285714	0,2	0,2	0,333333333	0,5	1	2
Pluie	0,111111111	0,125	0,142857143	0,142857143	0,2	0,333333333	0,5	1
Somme	2,745634921	4,80119048	8,176190476	8,176190476	14,03333333	21,83333333	31,5	42

Après l'application des lois on obtient les résultats suivants

Tableau 9: Tableau récapitulatif des résultats de la méthode AHP

	Lithologie	Linéaments	Drainage	Pente	Occupation	Exposition	Curvature	Pluie (%)	Somme	Poids	λ_{max}
Lithologie	0,364214482	0,41656335	0,366919045	0,366919045	0,356294537	0,320610687	0,253968254	0,214285714	2,659775	0,332472	0,912846
Linéaments	0,182107241	0,20828168	0,244612697	0,244612697	0,213776722	0,229007634	0,222222222	0,19047619	1,735097	0,216887	1,041316
Drainage	0,121404827	0,10414084	0,122306348	0,122306348	0,142517815	0,13740458	0,158730159	0,166666667	1,075478	0,134435	1,099164
Pente	0,121404827	0,10414084	0,122306348	0,122306348	0,142517815	0,13740458	0,158730159	0,166666667	1,075478	0,134435	1,099164
Occupation	0,072842896	0,06942723	0,061153174	0,061153174	0,071258907	0,091603053	0,095238095	0,119047619	0,641724	0,080216	1,125691
Exposition	0,05203064	0,04165634	0,040768783	0,040768783	0,035629454	0,045801527	0,063492063	0,071428571	0,391576	0,048947	1,068677
Curvature	0,04552681	0,02975453	0,02446127	0,02446127	0,023752969	0,022900763	0,031746032	0,047619048	0,250223	0,031278	0,985252
Pluie	0,040468276	0,02603521	0,017472335	0,017472335	0,014251781	0,015267176	0,015873016	0,023809524	0,17065	0,021331	0,895911

Tableau 10: Validation de la méthode et calcul de l'indice de cohérence

λ_{max}	IC	IRC	RC
8,228020472	0,032574353	1,45	0,022465071

Résultats de l'analyse hiérarchique de procédés

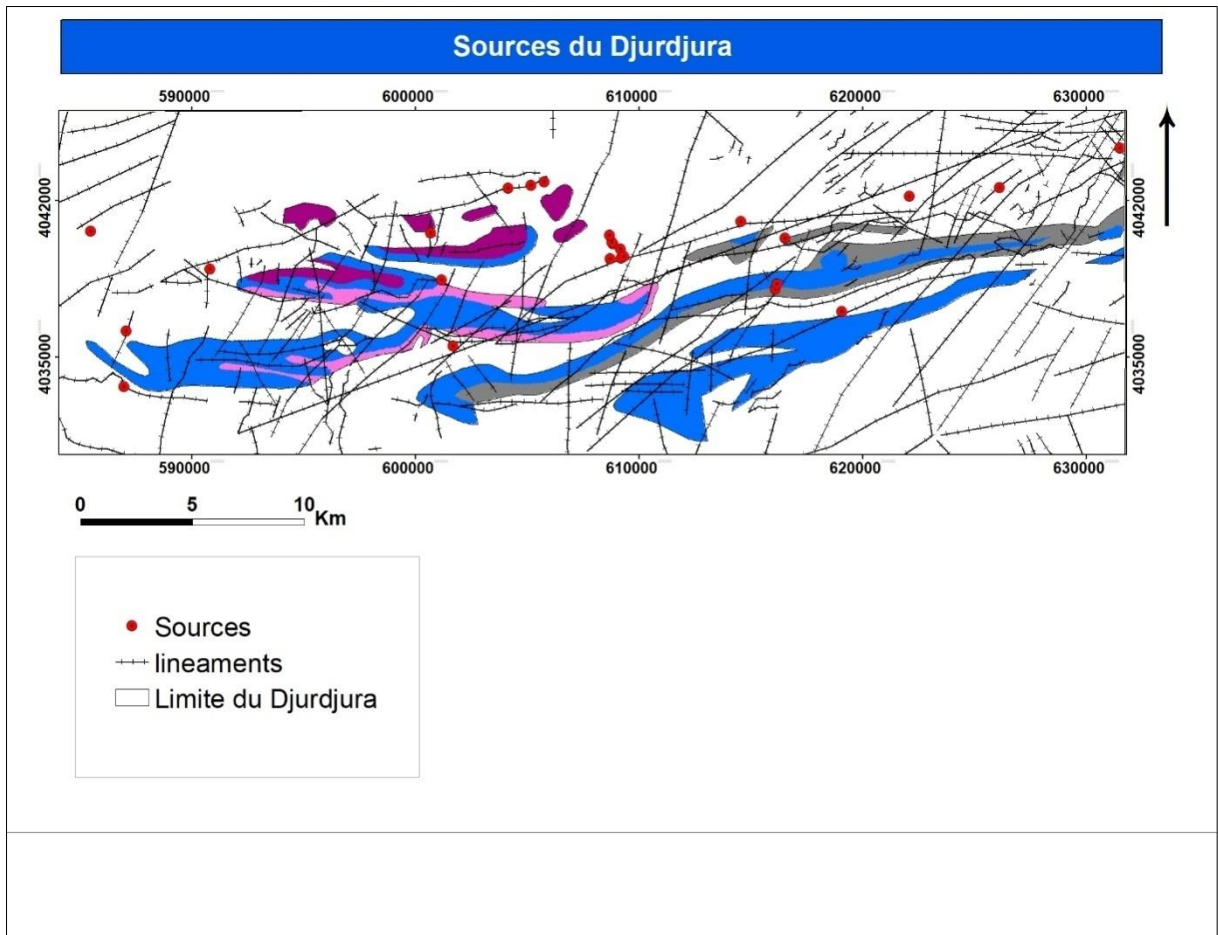


Figure 38: Carte des sources du Djurdjura

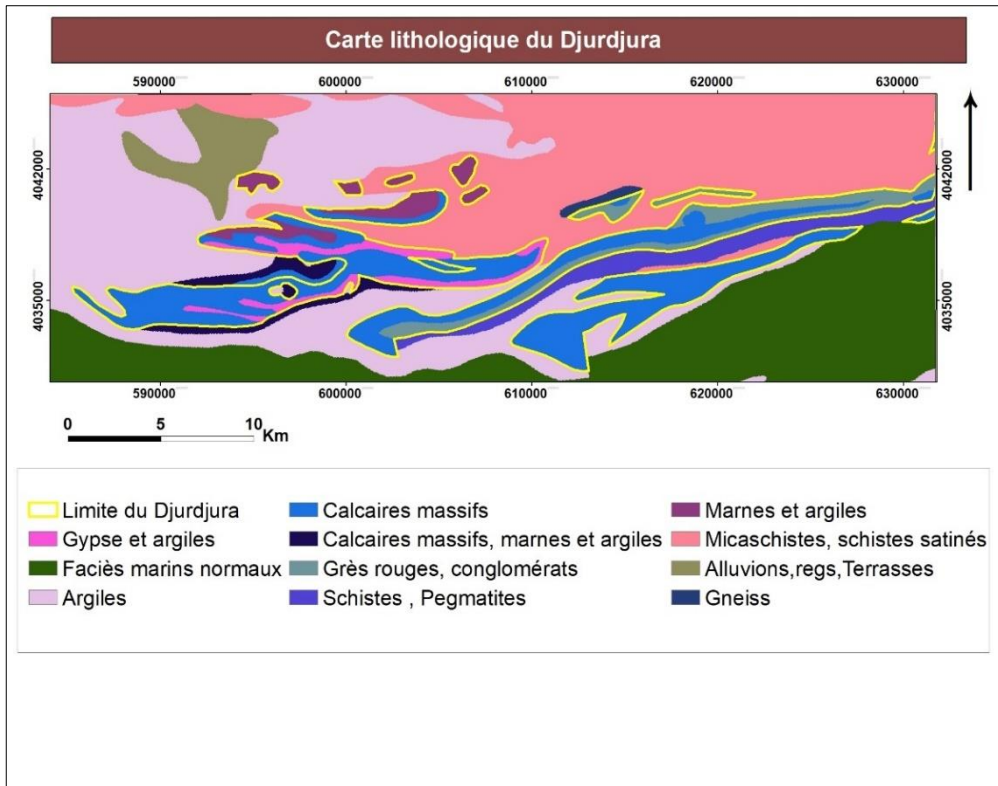


Figure 39 : Carte lithologique du Djurdjura.

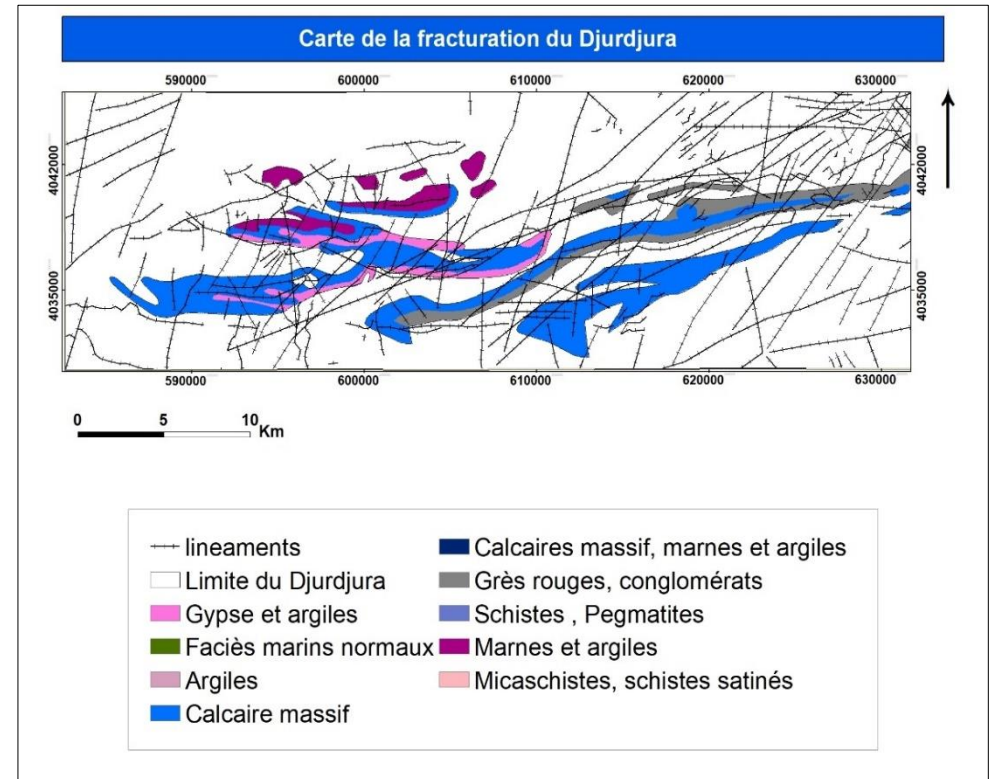


Figure 39: Carte de la fracturation du Djurdjura

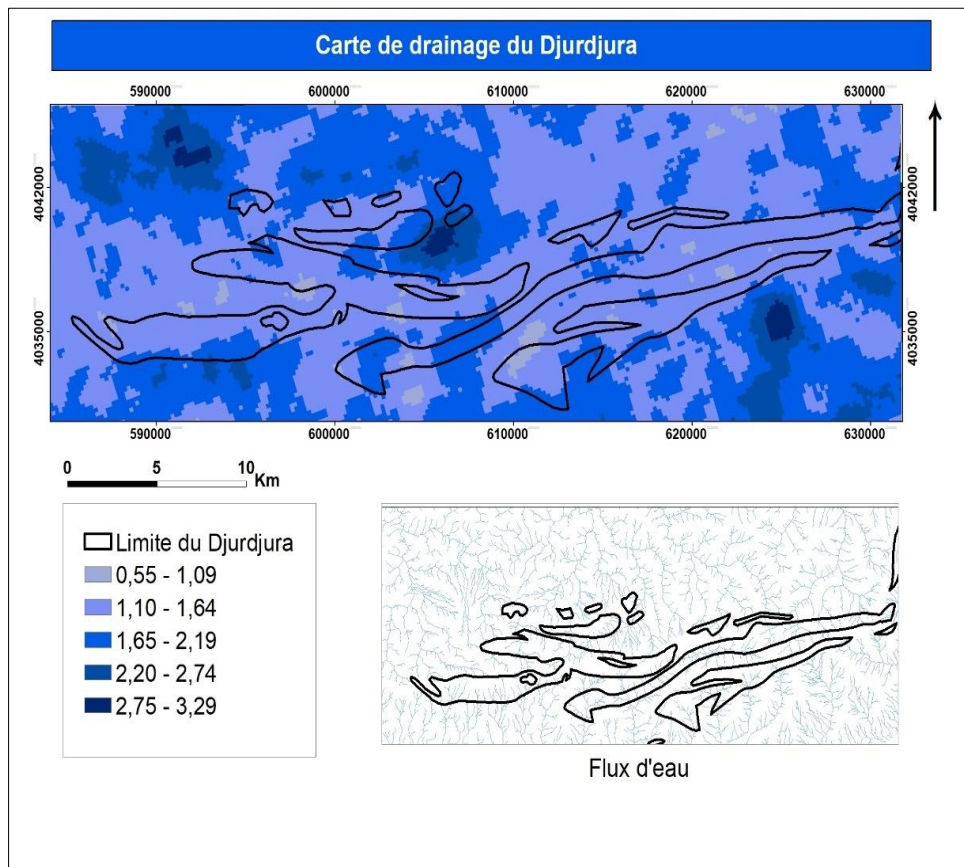


Figure 40: Carte de drainage du Djurdjura.

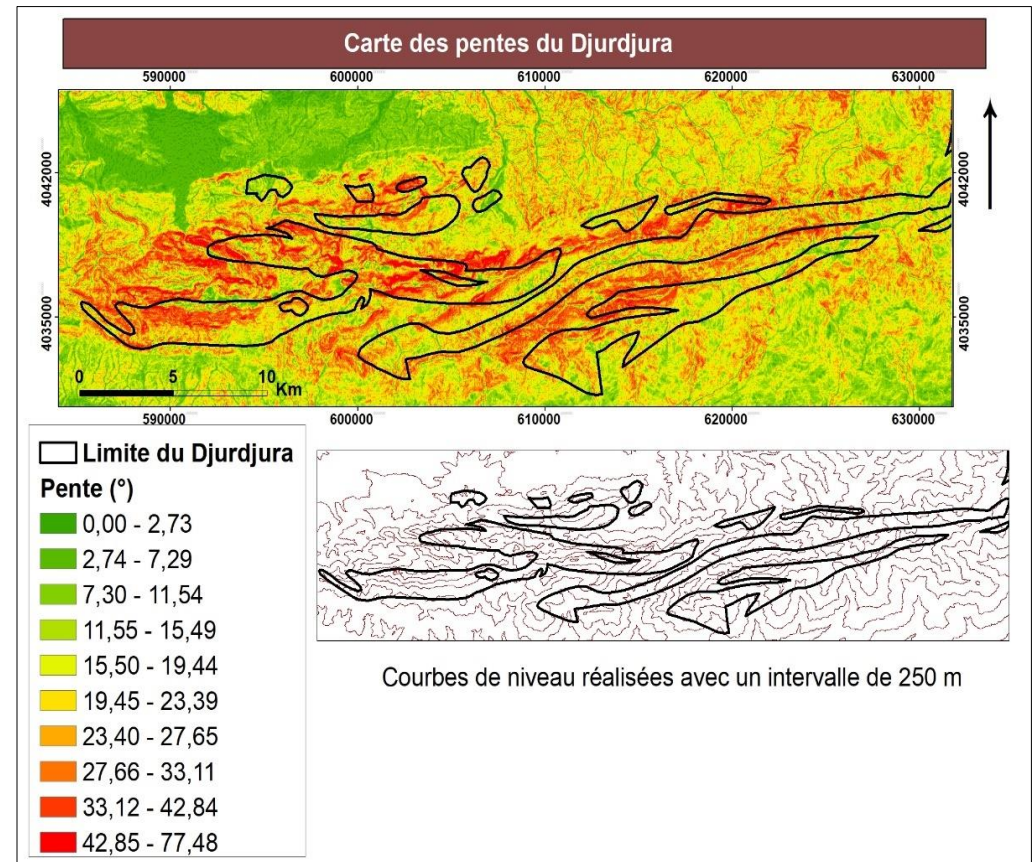


Figure 42: Carte des pentes du Djurdjura

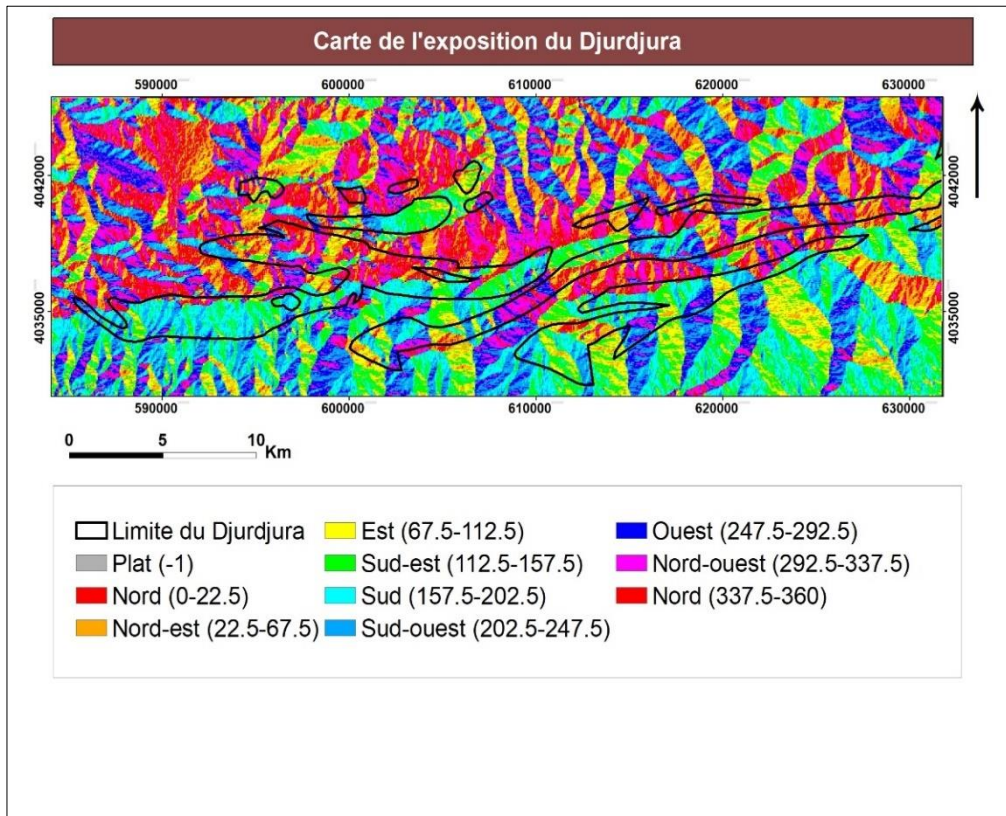


Figure 43: Carte de l'exposition du Djurdjura

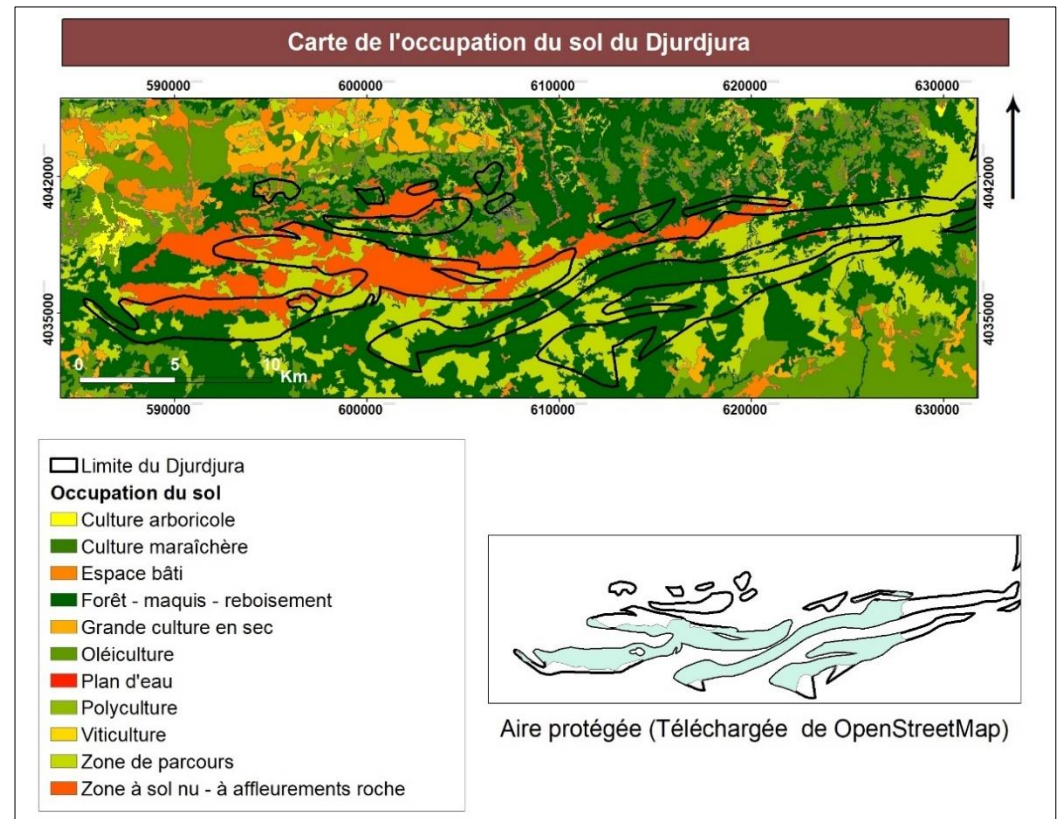


Figure 43: Carte de l'occupation du sol du Djurdjura.

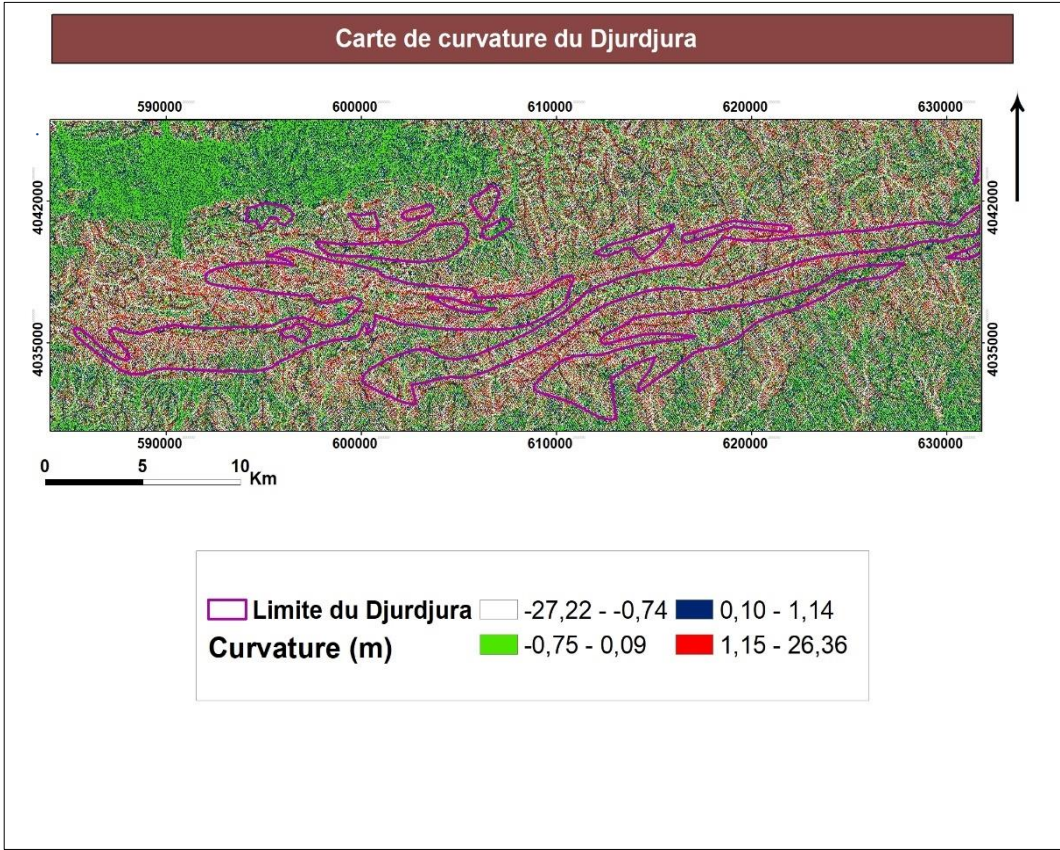
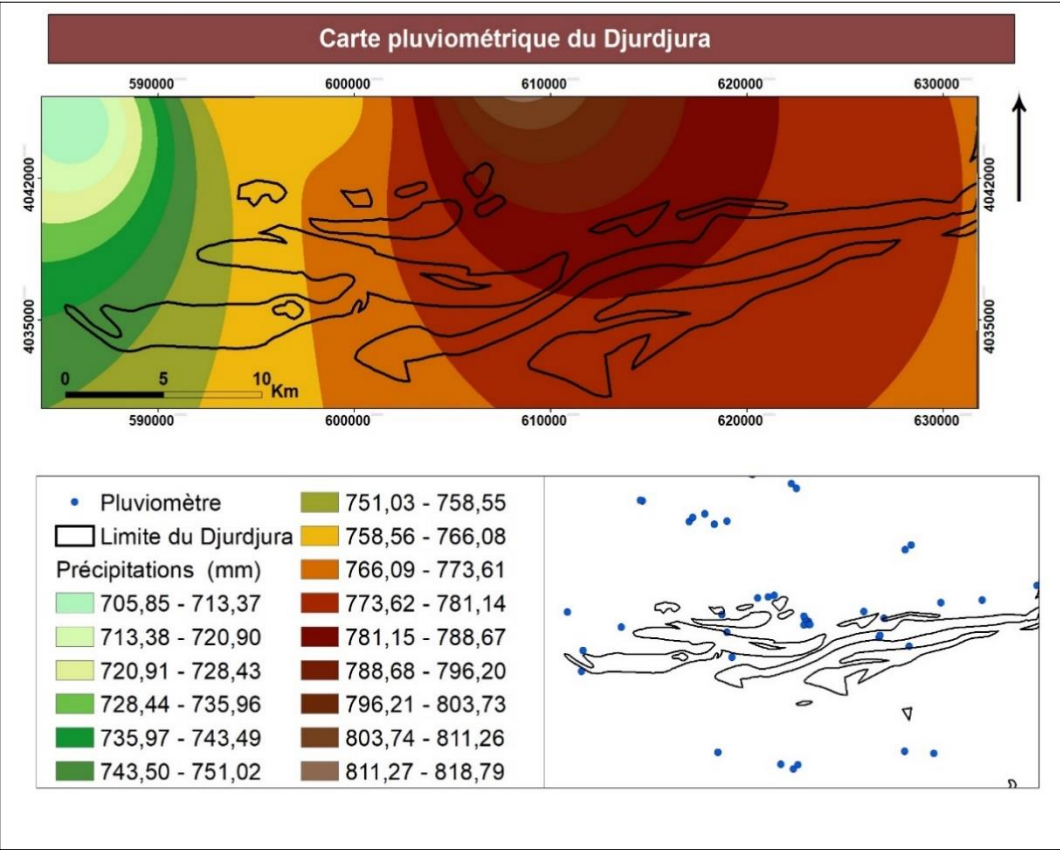


Figure 44: Carte pluviométrique du Djurdjura

Figure 46: Carte de courbure du Djurdjura.

Tableau 11: Estimation du potentiel hydrique

	Zone	Pourcentage de la zone
Très faible	10026	10,19731489
Faible	33737	34,31346623
Moyen	40226	40,91334418
Fort	14331	14,57587469

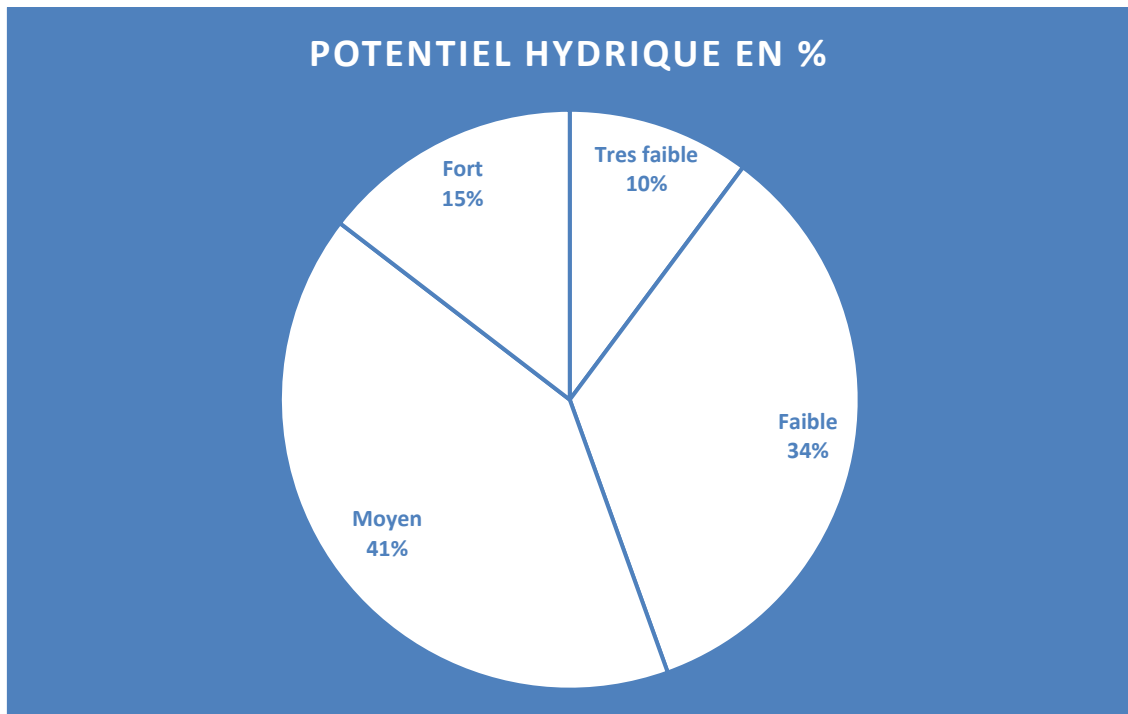


Figure 47: Pourcentage estimé du potentiel hydrique du Djurdjura

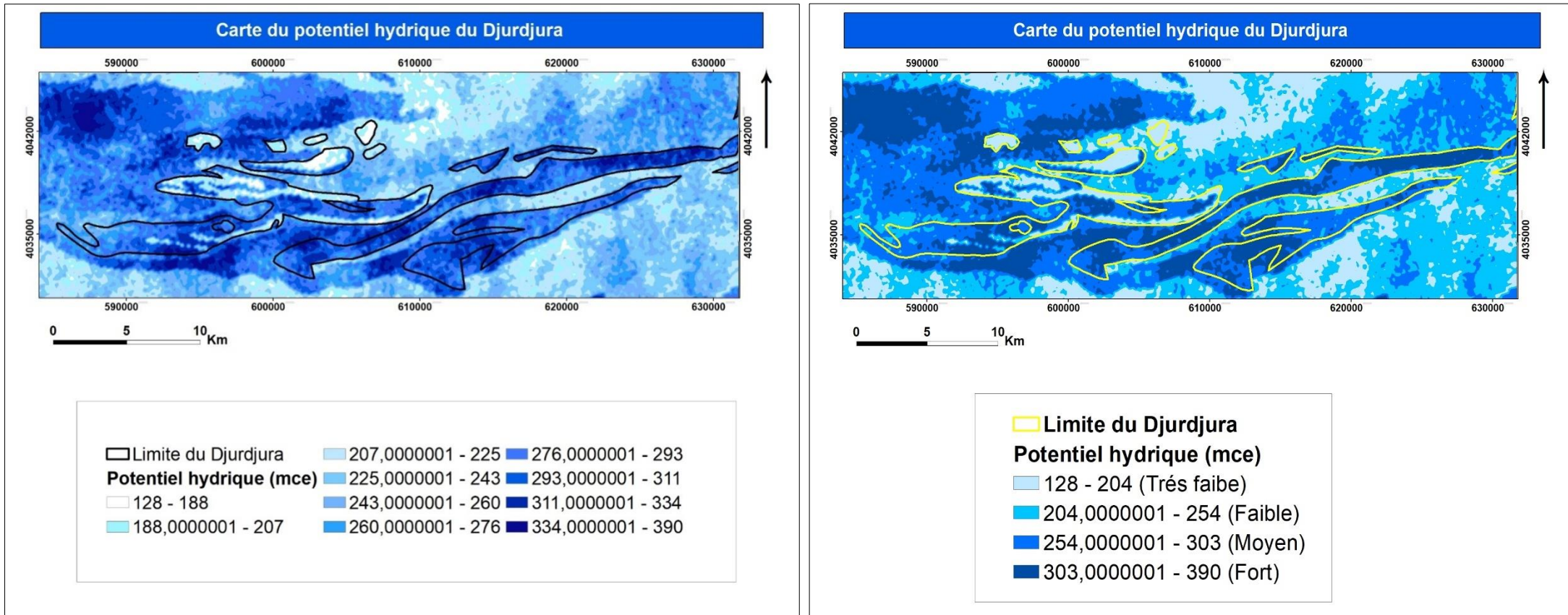


Figure 48: Cartes du potentiel hydrique du Djurdjura

Interprétation des résultats

Les résultats obtenus des calculs de la méthode AHP montre que le IC est inférieur à 0.1. Cette valeur indique que l'importance attribuer à chaque critère est logique.

Le tableau de l'estimation du potentiel hydrique indique que 56% de la surface globale du Djurdjura à un bon potentiel hydrique : avec un pourcentage de 15% pour un potentiel hydrique fort (203-390) mce et 41% pour un potentiel hydrique moyen (254-303) mce.

La fracturation importante dans le Djurdjura est un très grand facteur de la présence des karsts. Montrée dans les cartes de la fracturation, les calcaires massifs ainsi que tout le Djurdjura est très fracturé. Arrosée par une grande quantité de pluie (Figure 45 : Carte Pluviométrique) ces derniers grâce au climat chaud et humide de la région se sont transformés ou sont toujours en cours de transformation pour certains en karsts.

Les zones ayant le plus de potentialité en eau sont les zones qui coïncident avec les calcaires massifs fracturés même si les grès fracturés ainsi que les schistes fracturés sont aussi considérés comme des réservoirs qui peuvent renfermer de l'eau dans la région. Le positionnement des karsts connus du Djurdjura se superpose sur ces calcaires fracturés.

Les zones où la fracturation est la plus dense sont les zones où les sources se localisent. Les sources du Djurdjura sont des sources mises en évidence grâce à la tectonique. La carte de fracturation montre que les calcaires massifs sont compartimentés et donc la continuité peut être rompue, ce qui implique l'émergence des sources.

La carte de courbure confirme que dans les zones où le karst du Djurdjura est localisé la géomorphologie est particulière. On y trouve les agouinis, dolines et lapiés ainsi que les autres formes karstiques citées précédemment. Ses formes et courbure peuvent renfermer beaucoup d'eau sous forme de neige ou liquide.

L'exposition des versants au soleil accentue l'évapotranspiration et la fonte des neiges. Dans le Djurdjura le flanc nord reçoit plus de précipitation alors que le flanc sud reçoit des vents chauds. C'est pour cela que l'on trouve les pièges à neige sur le flanc nord car moins exposé au soleil elle garde beaucoup plus longtemps les neiges. Ces neiges qui du à la variation de la température et au phénomène du gel dégel se conservent plus longtemps que les précipitations liquides reçues dans les sommets. La neige fondue qui se dégel puis se recongèle devient plus dure et plus résistante à la chaleur et donc fond moins rapidement. Elle représentera une ressource d'eau pour les animaux, les plantes et les êtres humains durant la période de l'été.

Le potentiel hydrique est fort dans les sols nus des sommets du Djurdjura sommets fracturés et parfois karstifiés (forte pente jusqu'à 45%) le drainage et l'absorption de quelconque réseau hydrographique est favorisé par la pente forte.

Dans la zone de faible pente zone avec une végétation de type maquis qui est dense et moins haut qu'un foret permet à l'eau de s'infiltré lentement et de percoler jusqu'au réservoirs.

Tous les paramètres et critère utilisé confirme que le Djurdjura est une chaine de montagne riche en ressources hydrique. Les zones à fort et moyen potentiel sont les zones qui doivent être exploitée, captée et protégée.

Chapitre 5 : Conclusion

Conclusion générale

Le karst formé par les calcaires dont les types principaux sont les calcaires, les craies, les calcaires dolomitiques, les calcaires marneux, présente des caractéristiques très particulières dues à la prépondérance de la perméabilité de fissures sur celle d'interstices. Les eaux contenues dans les formations karstiques posent des problèmes hydrogéologiques particuliers.

L'écoulement latéral des eaux souterraines et leur zonalité sont déterminés, à alimentation constante, tant pour les terrains à perméabilité d'interstices qu'à perméabilité de fissures, par : la cote du niveau du drainage ou niveau de base, la position du substratum et leurs relations dans l'espace. Autrement dit, la géomorphologie joue un rôle important dans l'hydrologie karstique puisqu'elle étudie les déformations et accidents tectoniques et les variations du niveau de base. La tectonique intervient par la déformation des dépôts sédimentaires, les fractures, failles et les zones de broyage.

En règle générale, l'étude des eaux souterraines dans les calcaires doit être abordée par les méthodes classiques d'hydrologie et d'hydrogéologie adaptées aux caractères particuliers de l'aquifère. L'application des théories doit être contrôlée par l'observation et l'expérimentation, la géomorphologie, la géologie, la tectonique et la spéléologie.

Le travail de base d'une étude hydrogéologique d'un karst débute par l'étude de la fissuration (statistique des fissures, joints de diaclyse, joints de stratification, failles) dans les affleurements et si possible dans les cavités souterraines.

Les zones favorables à l'exploitation sont localisées en général sous les vallées sèches ou à cours d'eau pérenne qui représentent des secteurs de drainage actifs.

Le Djurdjura se subdivise géologiquement en dorsales. Celles-ci forment des unités structurales empilées ou accolées les unes contre les autres sous forme d'écaillés allongées de direction Est-Ouest.

Au niveau morphologique, le Djurdjura forme un massif contenant des calcaires karstifiés qui se détache en altitude avec de forts dénivelés (1000 m). En surface, les massifs calcaires sont criblés de cavités karstiques avec des champs de dolines, de lapiaz et des formes particulières au Djurdjura que sont les Tessereft ou puits à neige et les Agounis ou couloirs karstiques. Il forme un karst nu de haute montagne du type haut alpin.

Les cavités verticales du Djurdjura central, où se localisent les gouffres d'Assouil et d'Iflis atteignent 1000m de profondeur. Cette structure est favorable à un piégeage important des précipitations (pluies et neiges) en surface comme en profondeur.

Ces précipitations, nous amène à porter un intérêt particulier par la mobilisation de la ressource en eau dans cette région, d'autant plus que les disponibilités en eau actuelles ne répondent guère aux besoins de la population.

La structure particulière du Djurdjura en écailles conduit à l'élaboration d'unités hydrogéologiques formées de calcaires et dolomies du Lias qui sont compris entre des terrains beaucoup moins perméables (grès et argiles du Trias, marnes du Lias supérieur).

La méthode de AHP analyse hiérarchique des procédés nous a permis de confirmer que les potentialités hydriques du Djurdjura se trouve effectivement en grande partie dans les zones de calcaire massif fracturés. Ces calcaires non perméables qui gagnent en perméabilité grâce à cette fracturation sont souvent karstifiés.

Plus de la moitié de la surface du Djurdjura possède un potentiel hydrique de moyen (41%) à fort (15%) ce qui montre que cette région peut renfermer de grandes quantités d'eau.

Les sources du Djurdjura souvent misent en évidence grâce à des failles, sont généralement de bonne qualité.

Référence bibliographie

Abdesselam, M. (1995). Structure et fonctionnement d'un karst de montagne sous climat méditerranéen: Exemple du Djurdjura Occidental (grande Kabylie Algérie). Besançon.

Abdesselam, M., & al. (2000). Arguments hydrogéochimiques en faveur de Trias évaporitique non affleurant dans le massif du Djurdjura (dorsale kabyle, élément des Maghrébides). *Revue des sciences de l'eau/Journal of Water Science*, 13(2), 155-166.

Ablaoui, H. (2010). Structure et fonctionnement de trois émergences karstiques des Monts de Tlemcen à partir des réponses hydrologiques et hydrochimiques: Période du 12-12-2005 au 16-02-2007. Université Mohamed Ben Ahmed d'Oran 2.

Agrouche, S. (2021). Etude hydrogéologique et évaluation des ressources du Haut Sébaou (Wilaya de Tizi-Ouzou Nord Algérie). mémoire, Université Mouloud Mammeri de Tizi-Ouzou.

Bakalowicz, M. (1995). La zone d'infiltration des aquifères karstiques. Méthodes d'étude. Structure et fonctionnement.

Bouillin, J.-P. (1977). Géologie alpine de la Petite Kabylie dans les régions de Collo et d'El Milia (Algérie). Toulouse.

Bouillin, J.-P., & Raoult, J.-F. (1971). Présence sur le socle kabyle du Constantinois d'unolistostrome lié au charriage des flyschs; le Numidien peut-il être un néo-autochtone. *Bulletin de la Société géologique de France*, 7(3-4), 338-362.

Bourbia, S. (1988). Contribution à l'étude de la végétation et des sols de la forêt reliquée des Ait Ouabane. Thèse Ing. Agr., Univ. Tizi Ouzou.

Cherifi, T., & Laiche, Z. (2017). Contribution à la connaissance des éphéméroptères des cours d'eau de Grande-Kabylie. Université Mouloud Mammeri.

Collignon, & al. (1982). L'Anou Boussouil, témoin privilégié de l'évolution géologique récente du Djurdjura. *Revue belge de géographie*, 48-51.

Daif, M. (2017). Etude de quelques variables climatiques du sous-bassin de Sébaou (W. Tizi-Ouzou). Mémoire de master.

Djemai, M. (1985). Hydrologie du bassin versant du haut Sébaou: hydrogéologie des formations alluviales (Algérie). Université Scientifique et Médicale de Grenoble.

Durand Delga, M. (1969). Mise au point sur la structure du Nord-Est de la Berbérie. *Publ. Serv. Carte géol. Algérie, NS. Bull. Soc. Géol. fr*, 13(7), 328-337.

Ficheur, L. E. (1890). Description géologique de la Kabylie du Djurdjura : étude spéciale des terrains tertiaires : imprimerie de Fontana.

Kaci-moussa, D., & Moali, S. (2019). Suivi de la qualité hydrochimique des eaux brutes du barrage Taksebt en surface et en profondeur et des affluents de l'Oued Aissi. Mémoire de master, Université Mouloud Mammeri de Tizi-Ouzou.

Labat, D., & Mangin, A. (2015). Transfer function approach for artificial tracer test interpretation in karstic systems. *Journal of Hydrology*, 529, 866-871.

Bakalowicz, M. (1999). Connaissance et gestion des ressources en eaux souterraines dans les régions karstiques : SDAGE Rhône Méditerranée Corse.

Mangin, A. (1975). Contribution à l'étude hydrodynamique des aquifères karstiques. Université de Dijon.

Marsaud, B. (1996). Structure et fonctionnement de la zone noyée des karsts à partir des résultats expérimentaux. Paris 11.

Naak, M. (1988). Étude géologique de la dorsale interne du Djurdjura. Interprétation généralisée à l'ensemble de la chaîne et proposition d'un modèle d'évolution géodynamique de ce tronçon de la paléomarge continentale kabyle. Magister, Alger.

Quinif, Y. (1978). Contribution à l'étude des cavités karstiques du Djurdjura (Algérie). Description morpho-hydrogéologique et cadre évolutif. *International Journal of Speleology*, 10(2), 1.

Saadallah, A. (1981). Le massif cristallophyllien d'El Djazaïr (Algérie): évolution d'un charriage à vergence nord dans les Internides des Maghrébides. UNIV ALGRE. 160p.

Saadallah, A., & al., e. (1996). Coulissage dextre entre zones interne et externe des maghrébides, et structuration en fleur de la dorsale calcaire du Djurdjura (Algérie). *Geodinamica Acta*, 9(4), 177-188.

Said, R. (1995). Synthèse Géologique du Djurdjura (quelques éléments hydrogéologiques et géophysiques). Ministère de l'Équipement et de l'Aménagement du Territoire.

Seltzer, P. (1946). Le climat de l'Algérie. Université d'Alger. Institut de la Météorologie et de Physique du globe de l'Algérie.