

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE
MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE
UNIVERSITE MOULOD MAMMERI DE TIZI-OUZOU
FACULTE DES SCIENCES BIOLOGIQUES ET DES SCIENCES AGRONOMIQUES
DEPARTEMENT DES SCIENCES GEOLOGIQUES



Mémoire de fin d'études

En vue de l'obtention du diplôme de Master en sciences géologiques

Spécialité : Hydrogéologie

Thème

Application de la tomographie de résistivité électrique à la reconnaissance et à la protection des ressources en eau dans les milieux karstiques :
Cas du Djurdjura

Présenté par :

M^{lle}. AIT SI LARBI Samar

M^{lle}. TAKHARABTE Souhila

Devant le Jury composé de :

M. R. KARDACHE

M.C.A/UMMTO

Président

M^{me} R. AISSAOUI

M.C.B /UMMTO

Promotrice

M. S. MESSAOUDI

M.A.A /UHBC

Co-promoteur

M. F. AMROUCHE

M.A.A/UMMTO

Examineur

M. J. ABIZAR

Ingénieur/ALNAFT

Invité

Année Universitaire 2021/2022

Remerciement

On tient, en premier lieu, à remercier le grand Dieu pour nous avoir donné la force, la patience, la volonté et le courage de mener ce travail jusqu'à la fin.

On remercie aussi profondément notre promotrice M^{me}. R. AISSAOUI pour la confiance et les conseils qu'elle nous a apportés durant ce travail de fin d'études et aussi pour ses encouragements malgré des conditions exceptionnelles.

Nous adressons nos remerciements à notre co-promoteur M. S. MESSAOUDI pour son apport dans la pratique en mettant à notre disposition leur propre matériel de géophysique.

Nous tenons à remercier sincèrement M. J. ABIZAR qui a accepté de nous accompagner sur le terrain et qui a partagé son expérience et ses connaissances en géologie.

Nous adressons nos remerciements particuliers à M. R. KARDACHE qui est à l'origine de notre arrivée aux quelques données hydrologiques.

Notre profonde gratitude va également aux membres du jury qui nous fera l'honneur d'évaluer ce travail.

Nous sommes aussi reconnaissantes à tous les enseignants qui ont contribué à notre formation.

Dédicace

*Je dédie ce travail avant tout à ma famille
A ma très chère mère, qui a œuvrée pour ma réussite, par son amour,
son soutien et ses précieux conseils
Mon père, pour son soutien tout au long de mes études et surtout pour
sa générosité
Mon frère Djamel et Ma sœur Zahra
A toutes les personnes qui m'ont encouragé et qui m'ont aidé tout au
long de mes études.*

Souhila.

Dédicace

Je dédie ce travail à

Toute ma famille

*Mes très chers parents qui m'ont soutenue et encouragé durant ma
formation*

Mes chères sœurs

Ma grand-mère

A mes proches : Oncles, Tantes, cousins et cousines

Et à tous mes amis

*A toutes les personnes qui m'ont encouragé et qui m'ont aidé tout au
long de mes études.*

Samar.

Résumé

Le présent travail consiste à montrer l'apport de la tomographie de résistivité électrique à la reconnaissance et à la protection de ressources en eau dans un milieu karstique très hétérogène et anisotrope. Il s'agit d'un site situé à Aswel au Djurdjura à environ 150 km au Sud-Est d'Alger et à 40 km du littoral méditerranéen. Notons que l'aquifère karstique du Djurdjura est constitué principalement des calcaires.

La modélisation géo-électrique synthétique d'une forme rectangulaire située à différentes profondeurs avec des plusieurs dispositifs d'acquisition, à l'aide du logiciel Res2Dmod, nous a permis de choisir le dispositif d'acquisition le plus adapté pour le terrain.

Deux profils de tomographie électrique ont été réalisés, en utilisant le dispositif Wenner-Schlumberger et Dipôle-Dipôle. De forts contrastes de résistivités ont été observés dans les deux modèles et la même structure globale a été observée. Ils indiquent de fortes hétérogénéités lithologiques liées à la présence de contacts géologiques et une anomalie géo-électrique particulièrement résistante ayant la forme d'un anticlinal. Ces fortes résistivités ont été attribuées aux calcaires. Par ailleurs, ces mêmes résistivités, n'étant pas assez fortes, n'ont pas été affectées aux cavités.

Mots clés : Aquifère, Karst, Djurdjura, Résistivité, Tomographie.

Abstract

The present work has allowed us to show the contribution of electrical resistivity tomography to the recognition and protection of water resources in a very heterogeneous and anisotropic karst environment. It is a site located at Aswel in the Djurdjura at about 150 km South-East of Algiers and 40 km from the Mediterranean coast. Note that the karstic aquifer of the Djurdjura is constituted mainly of limestones.

The synthetic geoelectric modelling of a rectangular shape located at different depths with several array acquisition, using the Res2Dmod software, allowed us to choose the most suitable acquisition array for the field.

Two electrical tomography profiles were performed, using the Wenner-Schlumberger and Dipole-Dipole array. Strong contrasts of resistivities were observed in both models and the same global structure was observed. They indicate strong lithologic heterogeneities related to the presence of geological contacts and a particularly resistant geoelectric anomaly in the form of an anticline. These strong resistivities have been attributed to the limestones. On the other hand, these same resistivities, not being strong enough, have not been assigned to the cavities. From which precedes, one deduces that the Aswel chasm extends, probably, in other directions, under the limestone massif.

Sommaire

Remerciement	
Dédicaces	
Résumé	
Abstract	
Sommaire	
Liste des figures	
Liste des tableaux	
Liste des abréviations	
Introduction générale	

Chapitre 01 : Système karstique

Introduction	3
1.1. Karst et système karstique	3
1.2. Morphologie Karstique	4
1.2.1. Structure de paysage karstique	4
1.2.2. Zonation globale du karst	5
➤ Exokarst	6
➤ Endokarst	7
➤ Épikarst	8
1.3. Structure et fonctionnement (Caractère hydrodynamique du karst)	8
1.4. Classification des aquifères karstiques	12
➤ Systèmes non fonctionnels à structure peu karstique	12
➤ Systèmes fonctionnels	12
➤ Systèmes non fonctionnels à structure karstique	12
1.5. Sources karstiques	13
➤ Exurgence	13
➤ Résurgence	13
1.6. Travaux géophysique réalisés sur les Karsts	14
Conclusion	15

Sommaire

Chapitre 02 : Présentation de la zone d'étude

Introduction	16
2.1 Situation géographique	16
2.2 Géomorphologie	17
2.3 Géologie et reliefs	18
2.3.1 Géologie régionale	18
A. Zone interne :	18
B. Domaine des flyschs :	21
C. Oligo-Miocène kabyle (OMK) :	22
D. Bassin Miocène :	22
E. Quaternaire :	22
2.3.2 Géologie locale	24
2.4 Lithologie	25
2.5 Tectonique	26
Conclusion	27

Chapitre 03 : Hydrogéologie du Djurdjura

Introduction	28
3.1. Description de l'aquifère karstique	28
3.2. Hydrologie de surface	30
3.3. Approche Hydrogéologique	30
3.3.1. Lithostructure et ses conséquences hydrogéologiques	30
3.3.2. Fracturation et ses conséquences hydrogéologiques	31
3.3.3. Caractères hydrogéologiques de la recharge des aquifères	32
3.4. Réseau hydrographique	33
3.4.1. Description des bassins versants qui regroupe le Djurdjura	33
3.4.2. Description du bassin versant du site d'étude	34
3.5. Approche climatique	35
3.5.1. Climat de la Kabylie	36

Sommaire

3.5.2. Paramètres climatiques	36
a. Température	36
b. Précipitations	38
c. Humidité relative de l'air	43
d. Vent	44
3.6. Aperçu hydrochimique	45
3.7. Couvert végétal	46
Conclusion	46

Chapitre 04 : Tomographie de résistivité électrique

Introduction	48
4.1. Résistivité électrique	48
4.2. Paramètres influençant la résistivité	50
4.3. Tomographie de résistivité électrique	50
4.3.1. Principe d'acquisition	51
4.3.2. Dispositifs de mesure	52
4.3.3. Choix du dispositif sur le terrain	54
4.3.4. Domaines d'application	54
4.4. Modélisation géo-électrique (problème direct)	55
4.5. Inversion géo-électrique (problème inverse)	55
Conclusion	56

Chapitre 05 : Modélisation géo-électrique synthétique

Introduction	57
5.1. Aperçu sur les logiciels utilisés	57
5.2. Simulation de pseudo-sections sous forme d'un rectangle selon la profondeur	58
5.3. Influence de la distance inter-électrode sur la détection des cavités	63
Conclusion	67

Sommaire

Chapitre 06 : Application de la tomographie électrique

Introduction	68
6.1. Choix du profil de tomographie électrique sur le terrain.....	68
6.2. Instrument de mesure.....	69
6.3. Acquisition des données électrique sur le terrain	70
6.4. Analyse des données mesurées	70
6.5. Inversion 2D	72
6.6. Qualité des modèles de résistivité.....	72
6.7. Interprétation des modèles obtenu	74
6.8. Conductivité électrique	76
6.9. Utilisation de la TRE dans la protection des ressources en eau	78
6.9.1. Aperçu sur l'état d'Aswel	78
6.9.2. Apport de la TRE à la protection des ressources en eau	79
Conclusion	80

Conclusion générale.

Références bibliographiques.

Liste des figures

Figure 1. 1: Représentation du système karstique avec les différents éléments de sa structure (conduits ou drains, lieux de stockage ou "système annexe au drainage, épikarst, formes de surface), et les différentes modalités d'écoulement associés	4
Figure 1. 2: Bloc diagramme représentant un paysage karstique synthétique	5
Figure 1. 3: Zonation globale de karst	6
Figure 1. 4: Type élémentaire de lapiez	6
Figure 1. 5: Types élémentaires de doline	7
Figure 1. 6: Principe d'enfoncement du niveau de base (création de grottes, galeries, puits,...)	7
Figure 1. 7: Coupe synthétique d'un aquifère karstique.....	8
Figure 1. 8: Différentes configurations des karsts, selon la nature d'impluvium et la position du drain principal par rapport à l'exutoire	9
Figure 1. 9: Schéma représentatif de la zone épikarstique	10
Figure 1. 10: Modèle conceptuel du karst noyé	11
Figure 1. 11: Schématisation du système karstique.	12
Figure 1. 12 : Sources rencontré dans les karst	13
Figure 2. 1: Carte des communes limitrophes du territoire de la chaîne du Djurdjura.	17
Figure 2. 2: Photo prise de la formation de Permo-Trias (lit de vin) ,les premiers dépôts du mésozoïque.....	19
Figure 2. 3: Photo prise du Taletat.	20
Figure 2. 4: Photo prise de Lalla Khedidja.....	21
Figure 2. 5: Carte Géologique de la Chaîne du Djurdjura.	23
Figure 2. 6: Coupe géologique NNW-SSW à travers le Djurdjura, situation des deux gouffres d'absorption du Djurdjura.....	24
Figure 2. 7: Colonne stratigraphique synthétique du Djurdjura	25
Figure 2. 8: Schéma structural de la dorsale calcaire du Djurdjura (Grande Kabylie, Algérie) ..	26
Figure 2. 9: Photo prise d'un ensemble de faille affectée le massif.	27
Figure 3. 1: Réseaux hydrographiques des wilayas aux quelles appartient la chaîne du Djurdjura.	34
Figure 3. 2: Réseau hydrographique des sous bassins versant des bassins côtiers algérois.....	35
Figure 3. 3 : Evolution des températures moyennes mensuelles (°C) de Tizi-Ouzou (2012-2019).	37

Liste des figures

Figure 3. 4: Variation interannuelle des précipitations moyennes annuelles (1990-2019).....	40
Figure 3. 5: Evaluation des précipitations moyenne mensuelles à la station de Tizi-Ouzou (1984/2019).....	42
Figure 3. 6: Variation de l'humidité moyenne relative en % de la station de T.O, période (2012-2019).....	43
Figure 3. 7: Variation de la vitesse des vents moyenne 2015/2019 en m/s de la station de Tizi-Ouzou.....	45
Figure 4. 1: Schéma explicatif de la résistivité électrique ρ en fonction de A et L.....	48
Figure 4. 2: Gamme des résistivités couramment rencontrées en prospection géophysique	49
Figure 4. 3 :Principe de la tomographie électrique 2D..	51
Figure 4. 4: Représentation des électrodes et points de mesures pour le dispositif Wenner (avec a = distance inter-électrode et k = facteur géométrique).....	52
Figure 4. 5 : Représentation des électrodes et points de mesures pour le dispositif Wenner-Schlumberger (avec a = distance inter-électrode, n : niveau d'enregistrement et k = facteur géométrique)	53
Figure 4. 6: Représentation des électrodes et points de mesures pour le dispositif Dipôle-Dipôle (avec a = distance inter-électrode, n : niveau d'enregistrement et k = facteur géométrique)	53
Figure 4. 7: Illustration du principe du calcul du problème direct par la création de trois grilles .. La première grille est utilisée afin de définir les paramètres du modèle inversé, la seconde grille permet le calcul de la partie régulière du potentiel et la dernière grille (la plus fine) permet la résolution de la partie singulière du potentiel électrique.....	55
Figure 5. 1: Figure processus d'inversin dans res2dinv.....	58
Figure 5. 2 : En haut : modèle géo-électrique synthétiques modélisés avec Res2Dmod représente une cavité de 2m de haut sous une couche de 1 m d'épaisseur. En bas : comparaison de l'inversion des résultats du modèle direct avec la norme L1 pour quatre dispositifs d'acquisition TRE suivant: a) Wenner Alpha,b) Wenner Beta, c) Wenner Gamma, d) Pôle-pôle, e) Dipôle-dipôle, f)Pôle-Dipôle et g) Wenner-Schlumberger.	60
Figure 5. 3: En haut : modèle géo-électrique synthétiques modélisés avec Res2Dmod représente une cavité de 2 m de haut à une profondeur de 1 m . En bas : comparaison de l'inversion des résultats du modèle direct avec la méthode robuste pour les dispositifs d'acquisition TRE suivant :	

Liste des figures

Figure 6. 11: Photo d'élevage dans la doline d'Aswel	79
--	----

Liste des tableaux

Tableau 3. 1 : Températures moyennes mensuelles et annuelles (en degrés Celsius) de la station de Tizi-Ouzou (2012-2019)	36
Tableau 3. 2 : Températures maximales, minimales et moyennes mensuelles de la station d'Ait Ouabane (1990-2010)	38
Tableau 3. 3: Caractéristiques des stations pluviométriques utilisées	39
Tableau 3. 4: Précipitation annuelle des trois stations pour la série d'observation (1990-2019) .	40
Tableau 3. 5: Moyennes mensuelles des précipitations de la station de la station Tizi-Ouzou pour la période 1984/1985-2018/2019	41
Tableau 3. 6: Humidité relative moyenne mensuelle en % de la station de Tizi-Ouzou, période (2012-2019).....	43
Tableau 3. 7: Vitesse des vents en m/s de la station de Tizi Ouzou pour la période de 2015- 2019	44

Liste des abréviations

a : Facteur dépendant de la lithologie, variant entre 0.6 et 2, et distance inter-électrode

A : Section (m^2)

ANRH : Agence Nationale des Ressources Hydriques

BV : Bassin Versant

ENE : Est Nord Est

SAD : Systèmes Annexes de Drainage

NE : Nord Est

SW : Sud West

ONM : Office National de Météorologie

RMS: Root-Mean-Square (erreur)

T O : Tizi Ouzou

TRE : Tomographie de résistivité électrique

WSW : West Sud West

L : Longueur (m)

°C : Degré Celsius

2D : 2 dimensions

ρ_r : Résistivité de la roche

ρ_w : Résistivité de l'eau d'imbibition

Φ : Porosité

m : Facteur de cimentation

S_w : Saturation en eau de la roche

σ : Conductivité électrique mesurée par micro-siemens/centimètre ($\mu S/cm$).

ρ : Résistivité ($\Omega.m$)

I : Intensité du courant électrique (A)

U: Tension électrique (V)

λ : Paramètre de régularisation

Liste des abréviations

I : Matrice identité.

r : Différence entre les données mesurées d et la réponse du modèle direct $f(m)$; $r = d - f(m)$

Δm : Vecteur de changement des paramètres

S : Matrice de sensibilité S

n : Niveau d'enregistrement

k : Facteur géométrique

Introduction générale

L'eau est une ressource naturelle précieuse, elle représente un élément essentiel dans la vie et l'activité humaine. C'est une composante majeure des mondes minérale et organique. L'eau douce est devenue actuellement une denrée rare qui se dégrade de plus en plus, la pollution, la sur exploitation et la mauvaise gestion sont la cause de la dégradation et la rareté de cette ressource.

Les aquifères karstiques sont largement utilisés comme ressource en eau potable. Environ 25 % de la population mondiale dépend en grande partie, ou entièrement, de cette ressource. Les aquifères karstiques résultent du processus de la karstification. Ils possèdent une morphologie spécifique que ce soit au niveau de la surface avec la présence des dolines, des vallées sèches, de lapiez, de gouffre ou au niveau interne du massif carbonaté avec des réseaux de conduits (cavités, grottes).

Notre zone d'étude est localisée dans le massif du Djurdjura qui est une chaîne de montagne récente (20 million d'années) soulevée avec des versants à la verticale, située à environ 150 km au Sud-Est d'Alger et à 40 km du littoral méditerranéen. Elle est circonscrite entre coordonnées géographiques de 36°31'02" à 36°25'42" de latitude Nord et de 3°57'23" à 4°19'43" de longitude Est du méridien international. Administrativement, il est partagé par 3 wilayas : le versant Nord la wilaya de Tizi-Ouzou, le versant sud la wilaya de Bouira et quelques communes de la wilaya de Béjaïa. L'aquifère karstique du Djurdjura est composé principalement par de grandes cavités et drains verticaux guidés par la structure géologique, où le débit des sources varie selon la saison et sa nature.

L'objectif de ce mémoire est de montrer l'apport de la tomographie de la résistivité électrique à la caractérisation de l'aquifère karstique du Djurdjura et à la détection d'éventuel cavité qui pourrait exister dans ce système karstique.

Ce mémoire s'organise en six chapitres, d'une introduction générale et d'une conclusion générale. Le premier chapitre traite des généralités sur le système karstique ; il débute par une description de karst et système karstique, sa morphologie, sa structure et son fonctionnement hydrodynamique. Puis un aperçu sur la classification des aquifères karstiques et les travaux géophysiques réalisés sur les Karsts achèvent ce chapitre.

Le deuxième chapitre présente initialement les contextes géographique et géomorphologique du Djurdjura. Suivi d'une synthèse géologique et se termine par l'aspect tectonique.

Le troisième chapitre aborde en premier lieu une description détaillée de l'aquifère karstique. Ensuite vient une synthèse hydrogéologique avec un aperçu sur le réseau hydrographique et les bassins versants qui regroupent le Djurdjura en général, suivi d'une description détaillée du sous

Introduction générale

bassin versant de la zone d'étude. Enfin, on termine par une étude climatologique et un aperçu hydrochimique.

Dans le quatrième chapitre, nous avons défini la résistivité électrique et citer les différents facteurs qui l'affectent. Après avoir expliqué la tomographie de résistivité électrique (TRE), son principe d'acquisition, les différents dispositifs de mesures les plus utilisés, ainsi que leurs avantages, inconvénients et leurs choix sur le terrain. On termine ce chapitre par une description de la modélisation géo-électrique (problème direct) et l'inversion géo-électrique (problème inverse).

Le cinquième chapitre a parcouru la modélisation géo-électrique synthétique d'une cavité sous forme d'un rectangle en fonction de sa position en profondeur et la distance inter-électrode.

Dans le dernier chapitre, on aborde l'ensemble des travaux réalisés, dans la partie application de la tomographie de résistivité électrique, en commençant par les critères du choix de profil sur le terrain, puis la description de l'acquisition des mesures géo-électriques, et en passant par le traitement numérique des données, pour enfin terminer avec l'inversion et l'interprétation des profils réalisés. Dans cette dernière étape, on procède à l'évaluation de la qualité des modèles obtenus grâce à l'analyse de l'erreur quadratique moyenne (RMS).

Chaque chapitre, précédemment cité, commence par une introduction et se termine par une conclusion. Nous avons clôturé notre mémoire par une liste de références bibliographiques générée par un logiciel de gestion bibliographique EndNote.

Chapitre 01

Systeme karstique

Introduction

Parmi les masses d'eau souterraines, les aquifères karstiques sont largement utilisés comme ressource en eau potable. Environ 25 % de la population mondiale dépend en grande partie, ou entièrement, des aquifères karstiques (Ford & Williams, 1989).

La karstification est un processus d'érosion physico-chimique qui subit les formations carbonatées pour élargir les vides originels et donner aux formations carbonatées une porosité.

En profondeur, on peut trouver des cavités de plus ou moins grande dimension, ainsi que des réseaux de conduits se développant parfois sur plusieurs dizaines de kilomètres linéaires et plusieurs centaines de mètres verticalement.

Ce chapitre est dédié à la présentation de la structure du karst, sa morphologie, le fonctionnement du système karstique et les travaux géophysique réalisés sur les Karsts.

1.1. Karst et système karstique

Le karst est l'ensemble de formes superficielles et souterraines résultant de la dissolution de roches carbonatées (calcaires et dolomies) par l'eau rendu acide par le dioxyde de carbone ; par extension, l'ensemble de formes comparable se développant dans les roches salines (gypse, anhydrite, halite) (Bakalowicz, 1999).

Le système karstique est l'ensemble des formes de surface et souterraines organisées les unes par rapport aux autres pour constituer une unité de drainage. L'eau de pluies infiltrées chargée en gaz carbonique lors de son passage à travers le sol et sous l'effet d'un gradient hydraulique, circule dans les fractures de la roche. Par la suite, l'eau élargit les fissures par lesquelles elle circule et les transforme progressivement en conduites (Fig.1.1). Ces conduites sont organisées en réseau et drainent les eaux depuis la surface jusqu'à une source généralement unique tandis que des zones de stockage connectées au réseau de conduits prennent place dans la zone saturée (Bakalowicz & al., 2005; Mangin, 1975).

Le résultat final se traduit par une hétérogénéité considérable du milieu avec une organisation des vides déterminée par les écoulements souterrains (Chalikakis, 2006; Mangin, 1975).

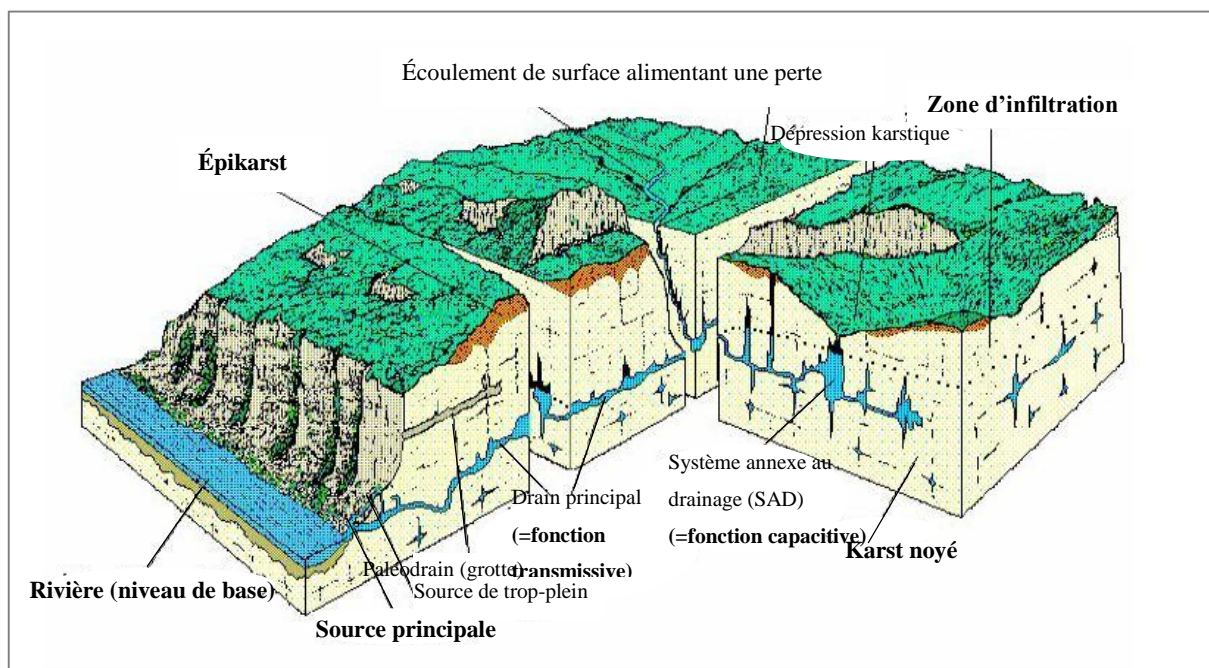


Figure 1. 1: Représentation du système karstique avec les différents éléments de sa structure (conduits ou drains, lieux de stockage ou "système annexe au drainage, épikarst, formes de surface), et les différentes modalités d'écoulement associés (Mangin, 1975).

1.2. Morphologie Karstique

Une grande diversité morphologique et hydrographique est constatée dans les différentes régions karstiques. La composition chimique de la roche et le climat, sa couverture sédimentaire, la tectonique de la région, la présence et l'épaisseur de couches imperméables intercalées, sont des facteurs qui peuvent déterminer des différences morphologiques considérables entre les régions karstiques (Chalikakis, 2006).

1.2.1. Structure du paysage karstique

Les aquifères karstiques résultent du processus de la karstification : ils possèdent une morphologie spécifique, que ce soit au niveau de la surface avec la présence de dolines, de vallées sèches, de lapiez (Mangin, 1975), de gouffre ou au niveau interne du massif carbonaté avec des réseaux de conduits (cavités, grottes, siphons...). Ils possèdent les caractéristiques suivantes (Fig.1.2) :

- Alimentation diffuse à l'échelle du bassin d'alimentation et alimentation ponctuelle au niveau des pertes des cours d'eau ;

- Existence de vitesse d'écoulement souterrain très importante (quelques centaines de m/h) ;
- Crues importantes et soudaines, de forte intensité, suivie d'une décrue rapide et d'un long tarissement ;
- Stockage temporaire au niveau d'un épikarst, zone sous-cutanée dans la partie supérieure d'un massif carbonaté, constituant un aquifère temporaire perché, discontinu, se vidangeant rapidement (Zeghid, 2013).

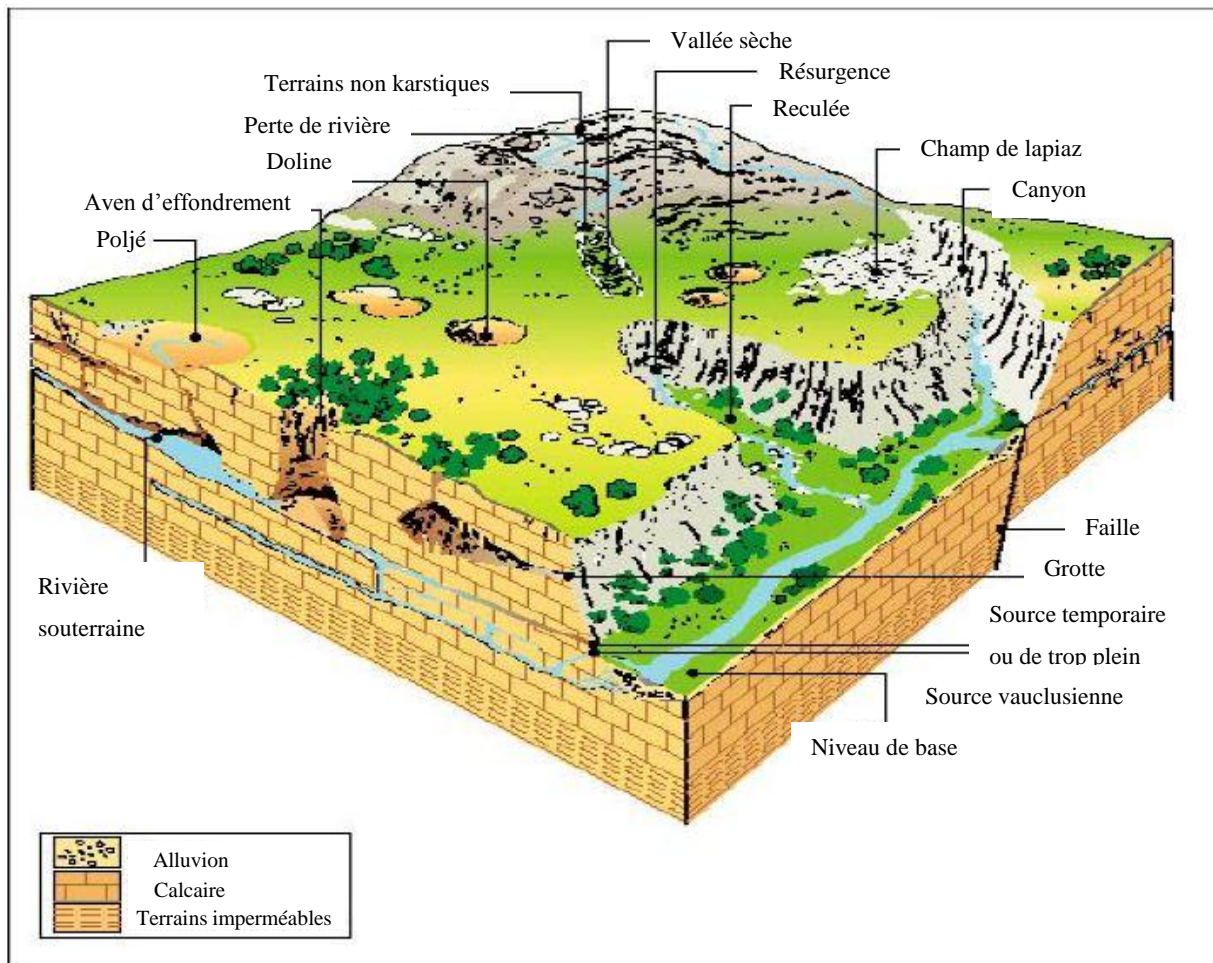


Figure 1. 2: Bloc diagramme représentant un paysage karstique synthétique (IBakalowicz, 1999).

1.2.2. Zonation globale du karst

On peut tout d'abord distinguer les formes karstiques de surface (exokarst) des formes souterraines (endokarst) et la zone de transition (l'épikarst) (Fig.1.3).

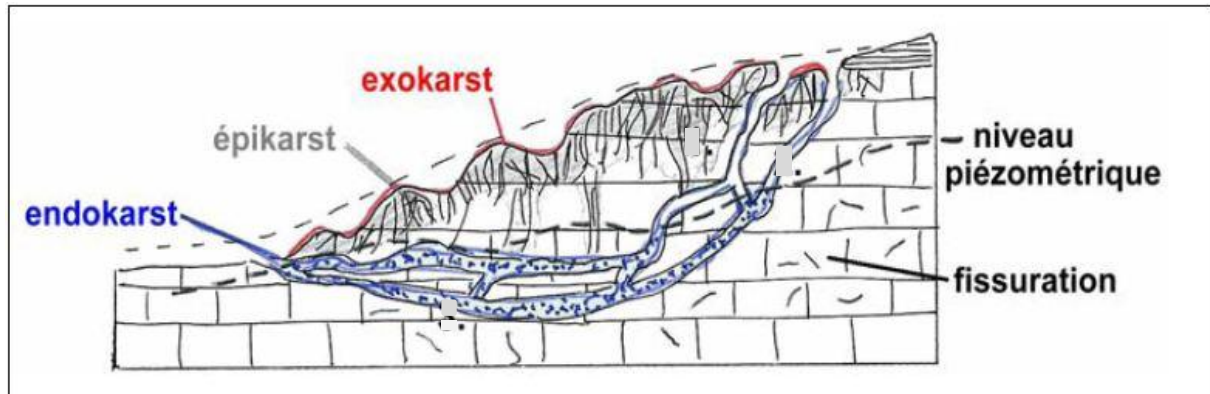


Figure 1. 3: Zonation globale de karst (Monbaron, 1993).

➤ Exokarst

Les dolines sont, avec les lapiaz, les premières expressions du karst en surface, même si on peut parfois retrouver ces morphologies plus en profondeur. Les poljés, gouffres, avens et ouvalas sont également des formes superficielles remarquables par leurs dimensions qui peuvent s'étaler sur de larges surfaces, les gouffres et les avens peuvent parfois atteindre des profondeurs de plusieurs centaines de mètres (Palmer, 1989).

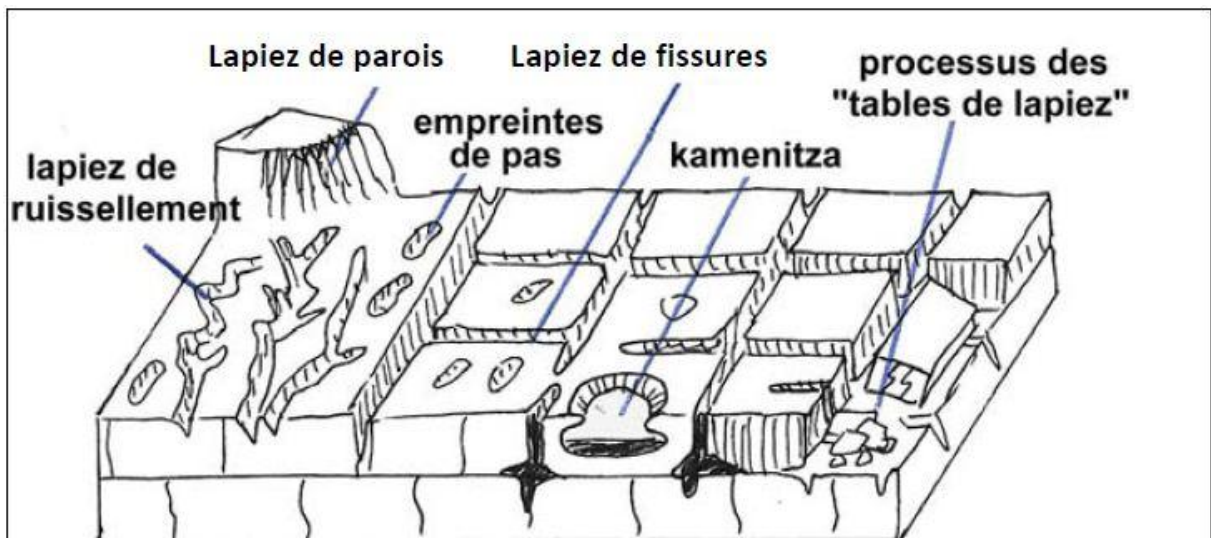


Figure 1. 4: Type élémentaire de lapiez (Valois, 2011).

Les lapiez : sont des formes d'érosion résultant de la dissolution à la surface et sur les fronts des couches calcaire, donnant une typologie très variée (Fig.1.4).

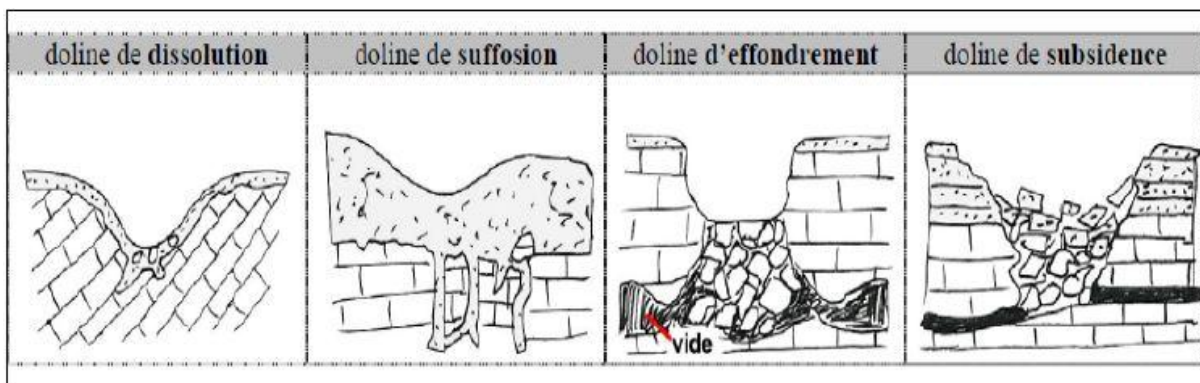


Figure 1. 5: Types élémentaires de doline (Monbaron, 2010).

Les dolines : dépression fermées souvent tapissées d’argile de décalcification, sa typologie selon la genèse (doline de dissolution / effondrement), ou en fonction de la présence d’une couverture non karstifiable (doline de subsidence et le soutirage enlève par infiltration le matériel dans le terrain non-karstique (phénomène de tassement)) (Fig.1.5).

➤ **Endokarst**

Sont les formes souterraines ; les gouffres et les conduits karstiques (Fig.1.6).

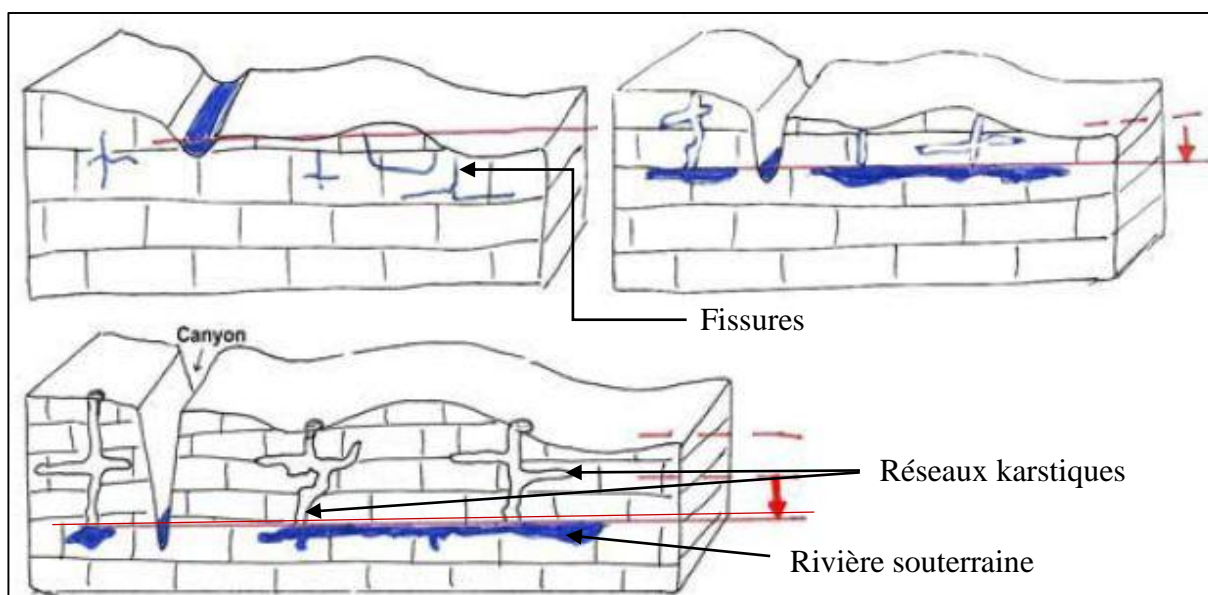


Figure 1. 6: Principe d'enfoncement du niveau de base (création de grottes, galeries, puits,...) (Jeannin, 1996).

➤ Épikarst

D'après (Willimas, 2008) c'est la frange la plus altérée du massif carbonaté où la porosité et la perméabilité sont plus fortes et plus homogènes. Ce sous-système a une fonction régulatrice car il stocke l'eau et distribue la recharge à la zone d'infiltration de manière rapide ou lente (Fig.1.7).

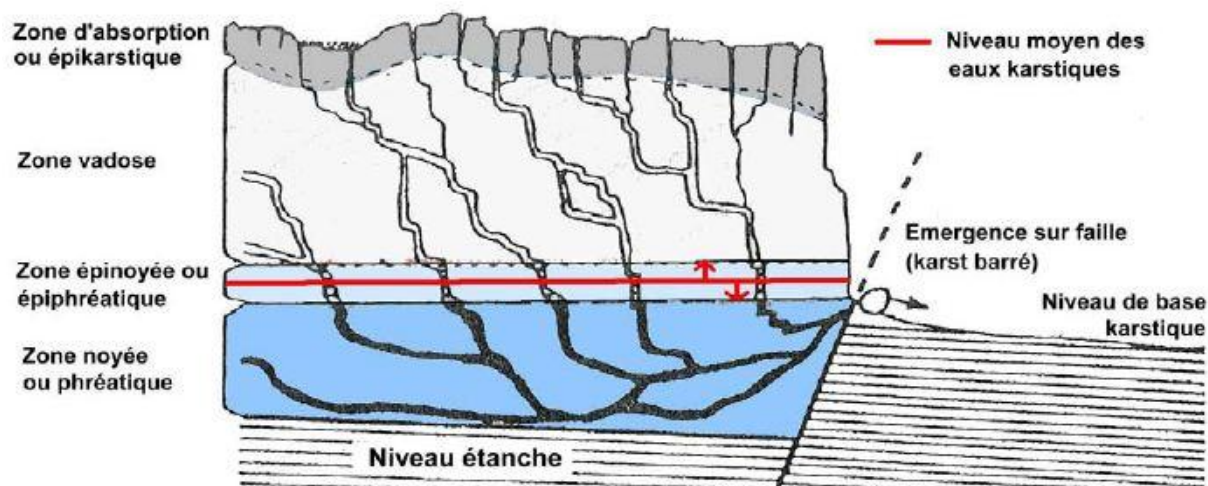


Figure 1. 7: Coupe synthétique d'un aquifère karstique (Mangin, 1975).

1.3. Structure et fonctionnement (Caractère hydrodynamique du karst)

La grande majorité des karsts étudiés correspond aux karsts dits classiques. (Mangin, 1975) a proposé la notion de système karstique qui est défini " comme l'ensemble au niveau duquel les écoulements de type karstique constituent une unité de drainage" et qui englobe les terrains non-karstiques.

Ces aquifères présentent des configurations selon la nature de l'impluvium et la position du drain principal par rapport à l'exutoire (Fig.1.8) (Chalikakis, 2006; Marsaud, 1996).

En fonction de **la nature de l'impluvium**, on distingue :

- Les karsts unaires pour lesquels l'ensemble de l'impluvium est constitué uniquement des terrains karstiques ;
- Les karsts binaires qui possèdent dans leurs bassins d'alimentation de terrains non karstiques et imperméables.

En fonction de **la position du drain principal**, on distingue :

- Les karsts jurassiens où le réseau de drainage s'organise à proximité du niveau de l'exutoire ;
- Les karsts vauclusiens où la karstification se développe en profondeur sous le niveau de base.

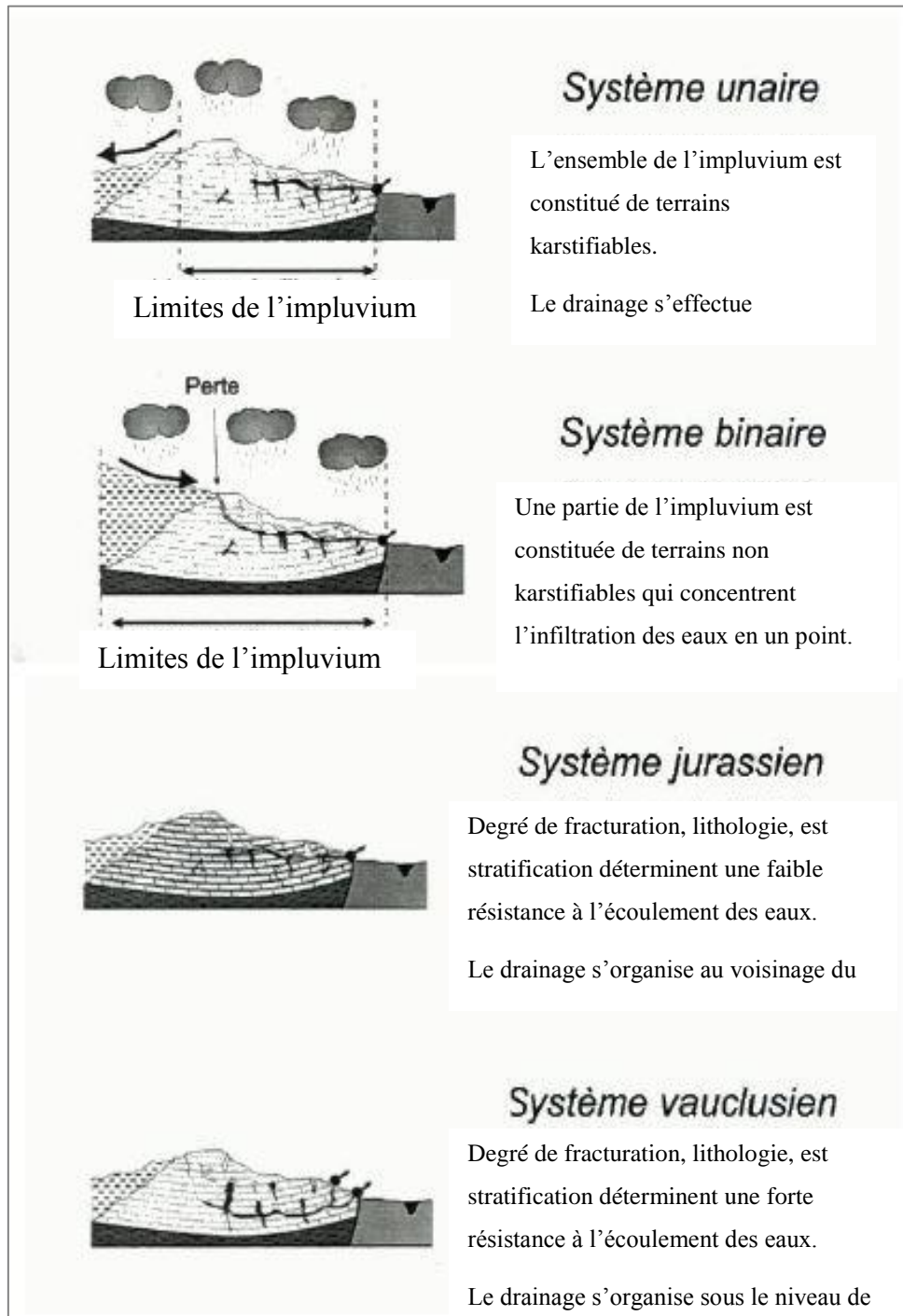


Figure 1. 8: Différentes configurations des karsts, selon la nature d'impluvium et la position du drain principal par rapport à l'exutoire (Marsaud, 1996).

L'aquifère karstique proprement dit, comporte trois zones principales : l'épikarst (La zone d'alimentation), la zone d'infiltration (zone non saturée) et la zone noyée (zone saturée) (Bakalowicz, 1979; Mangin, 1975).

Dans la partie la plus proche de la surface, les eaux de l'infiltration peuvent être momentanément retenues en formant un petit réservoir temporaire perché : l'épikarst. Cette partie est caractérisée par un fort degré de fracturation et d'altération, lui conférant une porosité de 5 à 15%, alors que la porosité de la partie, plus profonde, est limitée de 1 à 3% (Chalikakis, 2006; Plagnes, 1997).

La zone d'infiltration représente la partie non saturée de l'aquifère karstique (Fig.1.9), l'écoulement des eaux vers la zone saturée par les microfissures des blocs (infiltration lente), des fractures plus ou moins ouvertes (infiltration rapide) et des conduits verticaux (infiltration rapide) (Chalikakis, 2006).

Une des particularités de cette zone est de posséder plusieurs modalités d'infiltration :

- Une infiltration différée ou une infiltration directe selon l'existence ou l'absence d'un aquifère épikarstique ;
- Une infiltration lente avec de fortes pertes de charges dans les vides de petites tailles ou une infiltration rapide à partir des discontinuités verticales et subverticales largement ouvertes (Ablaoui, 2010).

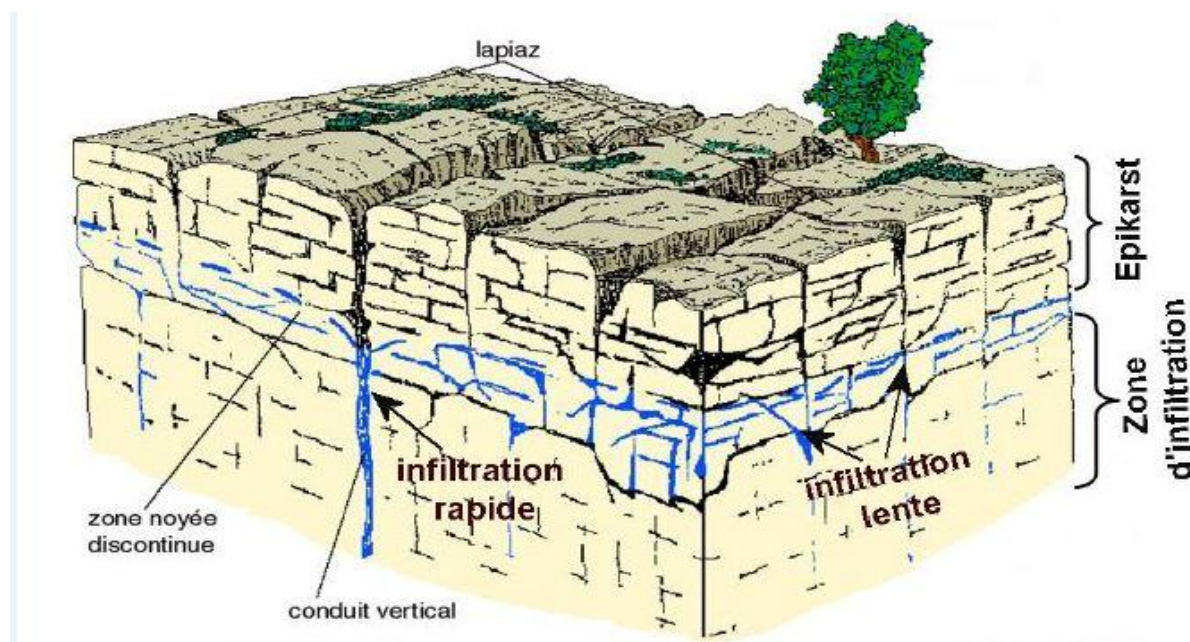


Figure 1. 9: Schéma représentatif de la zone épikarstique (Mangin, 1975).

La zone noyée est la partie la plus importante de l'aquifère karstique du point de vue de son exploitation. Sans être nécessairement présente dans tout l'ensemble du système karstique, elle se développe principalement à son aval. Le karst noyé est constitué par des drains ou axes de drainage et des systèmes annexes au drainage (Bakalowicz, 1995; Mangin, 1975).

Les drains ou axes de drainage sont constitués d'un ensemble de conduits autour duquel s'organise la zone noyée. Ils peuvent se développer dans la partie supérieure de la zone noyée ou en profondeur, en assurant la fonction transmissive du système, les écoulements y étant très rapides (>100m/h).

Les systèmes annexes en drainage (SAD) sont des vides de grande taille (Fig.1.10), situés de part et d'autre des drains auxquels ils sont connectés hydrauliquement. Ils assurent la fonction capacitive (stockage) de l'aquifère. Les écoulements y sont très lents et les temps de séjours longs (Chalikakis, 2006).

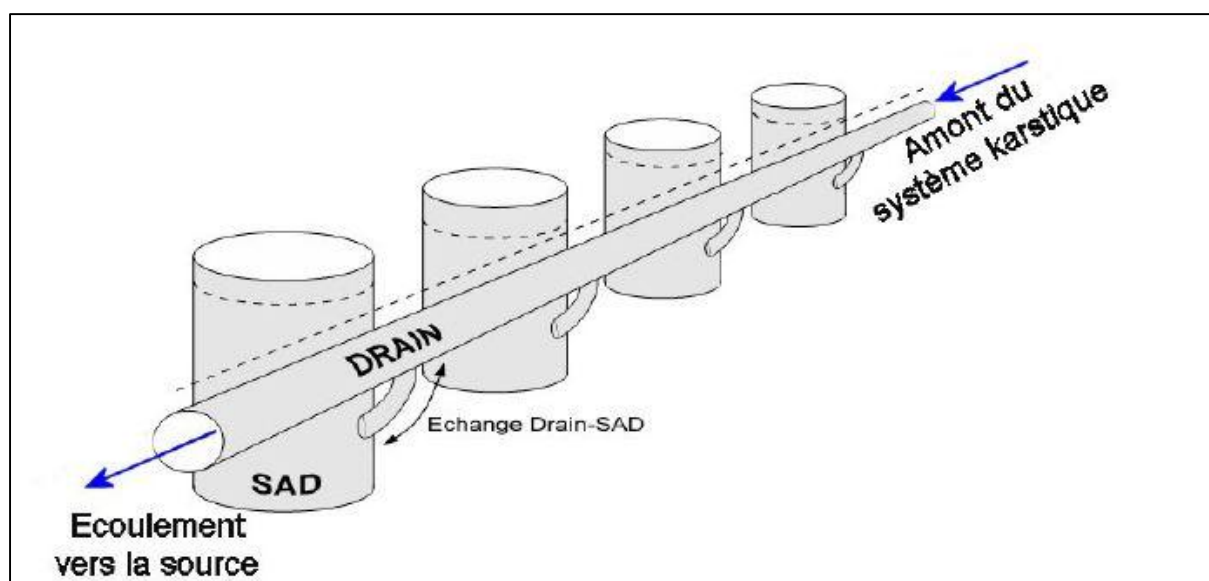


Figure 1. 10: Modèle conceptuel du karst noyé (Marsaud, 1996).

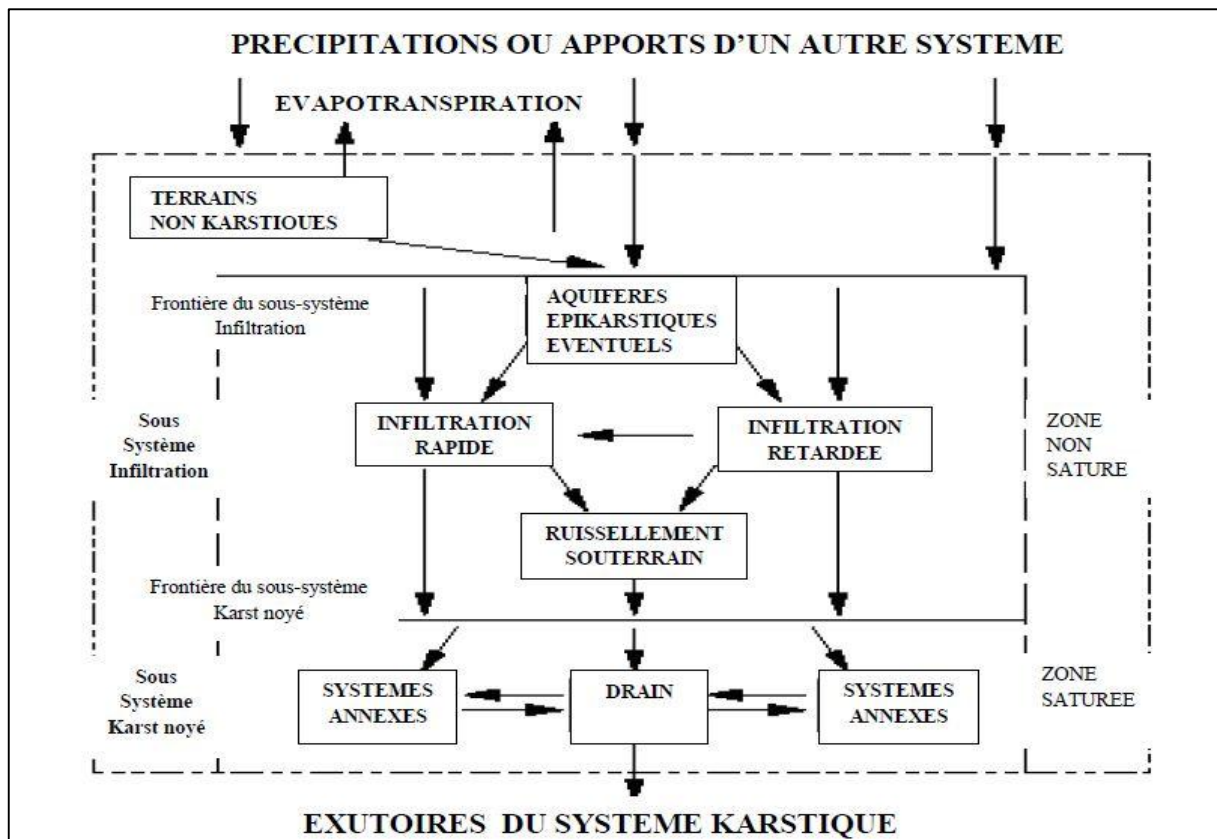


Figure 1. 11: Schématisation du système karstique (Mangin 1975).

1.4. Classification des aquifères karstiques

L'aquifère karstique est aussi le seul aquifère présent dans la nature dont les propriétés évoluent au cours du temps. Cette évolution est classé en fonction du degré d'évolution des vides (type1), de l'organisation des vides (type2) et des écoulements à l'intérieur du système (type3) (Marsaud, 1996).

Systèmes non fonctionnels à structure peu karstique et à faible ou fort potentiel (Type 1) : les vides et les écoulements ne sont pas organisés.

Systèmes fonctionnels à fort potentiel et structure karstique (Type 2) : l'organisation de la structure de drainage est plus ou moins évoluée. Les vides et les écoulements sont organisés.

Systèmes non fonctionnels à structure karstique et à faible potentiel (Type 3) : les vides sont organisés mais les écoulements ne rendent pas compte de cette organisation (Ablaoui, 2010).

1.5. Sources karstiques

Dans les zones calcaires, peu de rivières se trouvent à la surface car elles s’infiltrent dans le karst par les dolines, de petites fissures. L’eau, qu’elle provienne du ruissellement des eaux de pluie infiltrées sur l’ensemble du territoire ou d’une rivière de surface, va émerger à l’extérieur par des exurgences ou des résurgences.

➤ **Exurgence**

Source, parfois à fort débit, correspondant à l’émergence d’une rivière souterraine dont l’origine n’est pas dans la perte d’une rivière aérienne, mais uniquement dans l’infiltration.

➤ **Résurgence**

Source, parfois à fort débit, correspondant à la réapparition d’une rivière aérienne ayant effectué un parcours souterrain.

Trois types de sources sont rencontrés dans le karst sont drainage libre, karst barré et karst confiné (Fig.1.12).

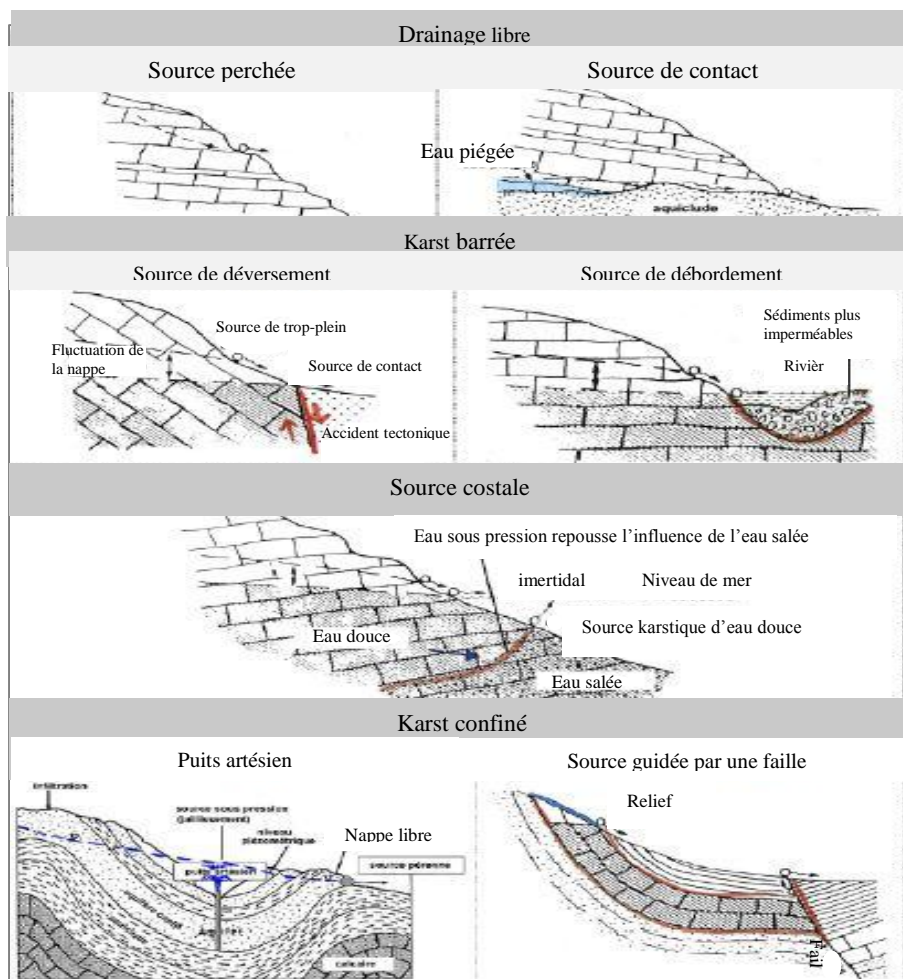


Figure 1. 12 : Sources rencontrés dans les karst (Monbaron, 2010)

1.6. Travaux géophysique réalisés sur les Karsts

Les méthodes de prospection géophysique ont pour objectif de caractériser les variations de certains paramètres physiques du sous-sol. Ces méthodes constituent un des outils les plus utilisés pour définir les ressources en eau dans les milieux poreux et fissurés. Bien que certaines études ont montré l'intérêt des applications de la géophysique à des structures karstiques. Sans exposer en détails tous les travaux géophysiques réalisés sur le milieu karstifié, cette partie du mémoire fera référence, aux principales études qui ont été réalisées jusqu'à présent.

(Militzer & al., 1979) ont modélisé la réponse théorique de formes karstiques par méthodes électrique. (Noel & XU, 1992) ont détecté des anomalies électriques qui correspondaient à des cavités karstiques en utilisant la tomographie électrique. (Vogelsang, 1987) a cartographié des fractures karstiques et des zones de failles, qui favorisent la circulation d'eau par méthodes électromagnétiques (slingram et VLF). (Kaufmann & Quinif, 2001) ont cartographié des zones d'effondrement liées à un paléokarst réactivé en couplant la tomographie électrique et la technique gamma-ray. (Busby, 2000) a déterminé les directions de fracturation en utilisant un dispositif électrique azimutal. (Šumanovac & Weisser, 2001) ont localisé des zones fracturées en combinant des mesures électriques et sismiques. (Kaufmann & Quinif, 2001) et (Zhou & al., 2002) ont montré l'utilité des tomographies de résistivité électrique (ERT) pour détecter des zones d'effondrements de la couverture. (McGrath & al., 2002) ont détecté une cavité d'une taille importante et peu profonde en utilisant la microgravimétrie et la tomographie électrique. (Zhou & al., 2002) ont démontré l'efficacité d'un dispositif de mesures électriques en configuration « effective array » pour la cartographie de zones de vulnérabilité à l'effondrement dans les formations karstiques. (Van Schoor, 2002) a délimité des zones de gouffres formées dans les dolomies en utilisant la tomographie électrique. (Vouillamoz et al., 2003) ont localisé la zone noyée d'un aquifère karstique en employant la méthode résonance magnétique protonique (RMP) et la tomographie électrique. (Debeglia & al., 2006) ont caractérisé des cavités karstiques peu profondes en combinant la microgravimétrie et l'analyse des ondes de surface. (Metwaly & AlFouzan, 2013) ont détecté les cavités souterraines dans la partie orientale de l'Arabie saoudite en utilisant la tomographie électrique.

Toutes ces études ont démontré que l'application de certaines méthodes à des cas spécifiques, peut donner des informations du sous-sol très intéressantes pour les géologues et ou les hydrogéologues.

Conclusion

Les aquifères karstiques sont caractérisés par des phénomènes géomorphologiques particuliers tels que l'existence de grandes sources localisées, de pertes, l'absence de drainage superficiel, l'existence de dolines, poljés, vallées sèches, lapiés et enfin l'existence d'un réseau karstique mis en évidence par les explorations spéléologiques. Le milieu karstique est le siège d'écoulements turbulents, torrentiels ou laminaires.

Les études à mener sur les systèmes karstiques nécessitent des investigations plus complexes et plus étendues dans le temps. Il est en effet nécessaire de considérer l'ensemble du bassin d'alimentation des ressources qu'il est envisagé de capter et il est souhaitable de réaliser un suivi hydrodynamique et hydrochimique au moins sur un cycle hydrologique complet.

Chapitre 02

Présentation de la zone d'étude

Introduction

Le massif du Djurdjura, avec ses hauts reliefs (2 308 m), est un élément majeur d'un ensemble géologique de la chaîne des Maghrebides. Il constitue les karsts les plus importants en Afrique ; par sa morphologie de surface typique et exceptionnelle.

2.1 Situation géographique

Le Djurdjura est une chaîne de montagne située à environ 150 km au Sud-Est d'Alger et à 40 km du littoral méditerranéen (Derridj, 1990). Elle est circonscrite entre coordonnées géographiques de 36°31'02" à 36°25'42" de latitude Nord et de 3°57'23" à 4°19'43" de longitude Est du méridien international (Amiri & Bekdouche, 2015). Du point de vue administratif, le Djurdjura intègre des portions de territoires des trois wilayas (Fig.2.1) :

- Le versant Nord, la wilaya de Tizi-Ouzou ;
- Le versant Sud, la wilaya de Bouira ;
- Et quelques communes de la wilaya de Béjaïa.

Ce territoire est constitué par la chaîne de montagne calcaire s'étalant sur 50 km d'Est en Ouest et ayant en moyenne 5 km de largeur. Cette chaîne se divise d'Est en Ouest en trois parties :

- Le massif oriental : Tamgout de Lalla-Khedidja (2308 m) ;
- Le massif central : de l'Akouker entre Tizi-Kouilal et l'Alma (Ras Timedouine : 2305m) ;
- Le massif occidental : de Haïzer (2164 m) (Loukkas, 2006).

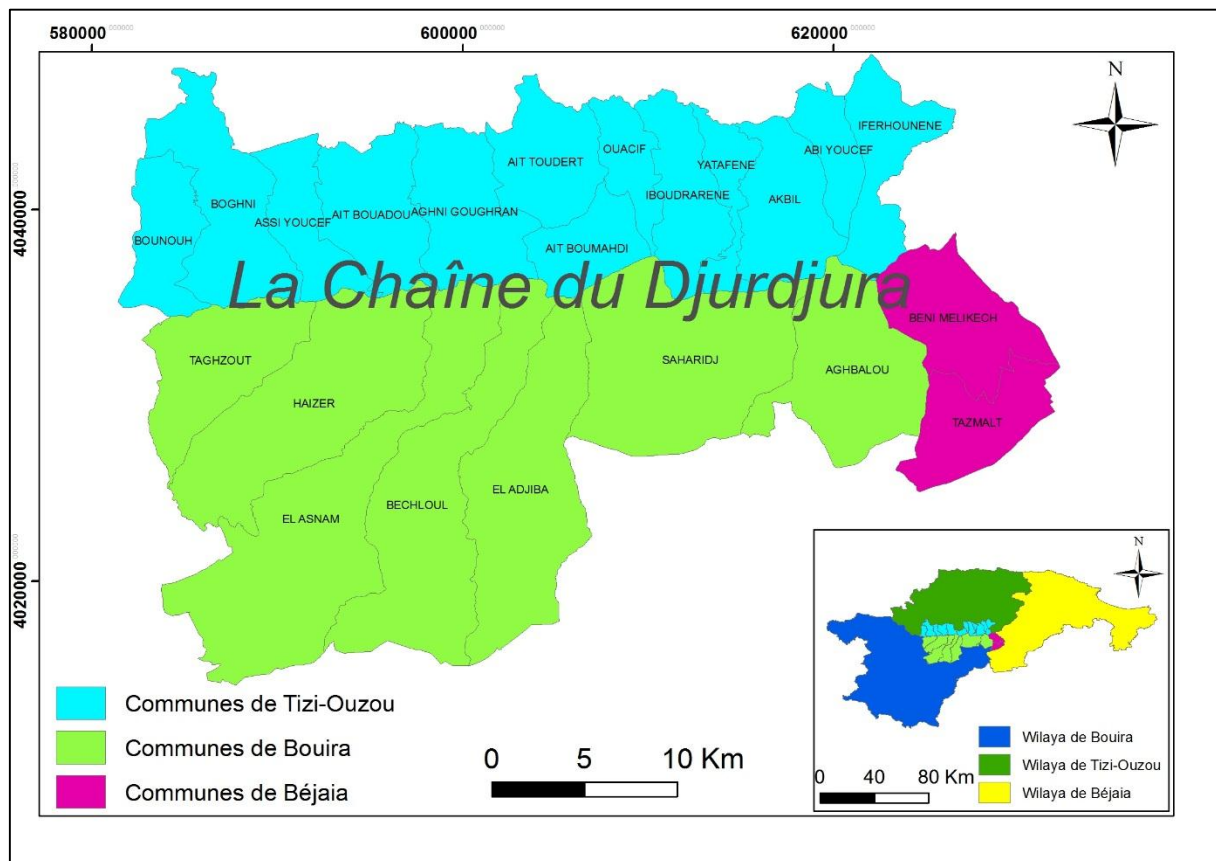


Figure 2. 1: Carte des communes limitrophes du territoire de la chaîne du Djurdjura.

2.2 Géomorphologie

Le Djurdjura est une chaîne de montagne d'âge Méso-cénozoïque fortement soulevée avec des versants à la verticale de plus de 100 m de dénivelée. Les crêtes oscillent entre 1200 et 2308 m à son point culminant (Tamghou Lalla Khedidja) (Abdesselam, 1995).

Le Massif du Djurdjura échelonne des crêtes rocheuses dépassant l'altitude de 2000 m (Dubuis & Faurel, 1994). La géomorphologie est très variable avec un relief très accidenté (Meddour, 2012), présente un faciès principal composé essentiellement de terrains calcaires, des formations silico-clastiques ou argilo-gréseuses, qui lui confèrent une grande résistance à l'érosion linéaire mais fortement karstifiées.

(Krouchi, 1995) note que le versant Sud du Djurdjura, présente un relief moins accidenté comparativement au versant Nord. Les karsts, les dolomites et le lapiaz, représentent les principaux modèles géomorphologiques d'après les données du (P.N.D., 2011).

2.3 Géologie et reliefs

2.3.1 Géologie régionale

Les Maghrébides correspondent à l'entité géologique africaine de la chaîne alpine, On y distingue les zones externes et les zones internes. Ces dernières comportent essentiellement des massifs cristallophylliens d'âge paléozoïque au même plus ancien ayant enregistré plusieurs événements tectonique et métamorphique, ces massifs sont bordés vers le sud par une chaîne calcaire (Saadallah, 1981).

A. Zone interne

a) Socle kabyle

On le rencontre dans deux séries d'affleurements : au Nord, les massifs de la grande et la petite Kabylie, plus au Sud, le substratum de la dorsale. Il comprendrait les termes suivants :

- Un ensemble cristallin profond composé de quartzites, granulites (Bouillin, 1977)
- Des gneiss présentent des intercalations de quartzites, d'amphibolites et de marbre.
- Des phyllades ayant subi un métamorphisme de basse pression avec une zone inférieure à biotite et une zone supérieure à chlorite.
- Une ensemble essentiellement sédimentaire paléozoïque débutant au Cambrien (Baudelot & Gery, 1979) et atteignant le Carbonifère. Il est aussi attribué par trois ensembles géomorphologiques :

-Un ensemble cristallophyllien inférieur formé de gneiss à intercalations à fois puissantes de marbre et d'amphibolites.

-Un ensemble peu métamorphique supérieur comporte « des schistes satinés ou phyllades, des métras grés et des porphyroïdes oeillés ».

-La couverture sédimentaire paléozoïque du socle cristallin, peu ou pas métamorphique dont les séries des termes de l'Ordovicien, du Silurien, du Dévonien, aussi que du carbonifère inférieur. Le socle est par endroit recouvert en discordance par des dépôts détritiques (principalement des molasses conglomératiques) d'âge Oligocène supérieur Miocène inférieur appelé Oligo Miocène Kabyle. Il est bordé au Sud par les unités méso-cénozoïques de la dorsale Kabyle autrement dites la chaîne calcaire à cause de l'importance du Jurassique calcaire (Saadallah & al., 1996).

b) Dorsale kabyle (la chaîne calcaire)

La dorsale kabyle ou la chaîne calcaire est située au Sud du socle kabyle, elle est étudiée en détail dans sa partie orientale par (Durand Delga, 1969). C'est une zone étroite discontinue qui caractérise l'axe interne de l'orogène nord-algérienne, elle est subdivisée en trois unités :

➤ **Dorsale interne** : sur un substratum continue de phyllades et de rares affleurements paléozoïques existent :

Un Pérmo-Trias gréseux rouge, un Lias carbonaté, un Jurassique supérieur et un Crétacé carbonatés noduleux comportant d'importantes lacunes et d'épaisseur réduite, et un Tertiaire transgressif d'abord néritique jusqu'au Lutétien.

La dorsale interne englobe le massif de Kouriet et ses annexes d'Agouni Gheghrane, Tikourabine ;



Figure 2. 2: Photo prise de la formation de Permo-Trias (lit de vin), les premiers dépôts du Mésozoïque.

➤ **Dorsale médiane** : elle correspond à une série condensée continue du Crétacé inférieur à l'Eocène avec des facies marneux et calcaire-marneux pélagiques.

Elle englobe l'ensemble Haïzer-Akouker culminant aux massifs de Tachagaguelt du Gougane et du Taletat (main du juif). Il occupe une position structurale relativement centrale de la chaîne (Fig.2.3).



Figure 2. 3: Photo prise de Taletat.

➤ **Dorsale externe** : définie par :

Un lias particulier souvent à Ammonites et Rhychonelles., Une série conglomératique du Dogger-Malm, qui se termine par des Radiolarites gréseuse du Crétacé inférieur et conglomératique du Sénonien au Lutétien.

La dorsale correspond à un ensemble de lame et d'écailles empilées qui sont chevauchées au nord par le socle Kabyle. Elle comprend la succession des crêtes correspondant à l'anticlinal de Tikjda-Ait Ouabane. Les massifs culminants de Lalla Khedidja (2308m) prolongeant à Est (Fig.2.4) ;



Figure 2. 4: Photo prise de Lalla Khedidja.

B. Domaine des flyschs

Les flyschs sont connues par leur complexité structurale à cause de la pauvreté de celle-ci en fossiles (Bendif & Beldjilali, 2018).

a) Flysch mauritanien

Qui comporte, un flysch calcaire Néocomien à radiolarites attribuées au Crétacé, un flysch à gros bancs des grès (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.

b) Flysch massylien

le flysch massylien comporte 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 dominent les couleurs vertes ; surmonté par un Vraconien épais de quelques mètres de calcaire fins jaunâtre, un Cénomanien et un Turonien sur 20 m d'épaisseur à phanites noirs et blancs localement remplacés par des

brèches polychromes (Raoult & JF, 1974) et un ensemble flyschoidemarno-microbrèche où l'on date 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.

c) 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 grés épais à grains hétérogènes et des argiles, marnes et silèxites appelé supra-numidiennes.

C. Oligo-Miocène kabyle (OMK)

Le terme Oligo-Miocène kabyle (Bouillin & Raoult, 1971) désigne la couverture conglomératique et gréseuse discordante sur le socle métamorphique de Grande et Petite Kabylie, transgressive, comprenant des éléments du Socle Kabyle et de la Dorsale Kabyle (Abbassene, 2016).

D. Bassins Miocènes (post nappe)

Ce sont des terrains d'âge Miocène déposés postérieurement à la mise en place des nappes. Les terrains de cet ensemble occupent un vaste synclinale représenté par des conglomérats et d'une molasse gréso-marneuse (100 à 250 m d'épaisseur) et d'une formation argilo-marneuse (500 m au maximum) (Amari & Ameur, 2021).

E. Quaternaire

Il est représenté par des faciès variés. Dans les vallées, il se développe avec des cailloutis, les alluvions (anciennes, récentes et actuelles) de blocs polygèniques, des colluvions (argiles et pelites) (Amari & Ameur, 2021).



Figure 2. 5: Carte Géologique de la Chaîne du Djurdjura, Extrait de la Carte de l'Algérie de 50.000. Publiée par l'Institut Géographique National.

2.3.2 Géologie locale

Le massif du Djurdjura avec ses hauts reliefs (2308m), est un élément majeur d'un ensemble géologique de la chaîne des Maghrébides.

Le massif a été formé par le charriage, du Nord vers le Sud, de plusieurs grandes écailles dont l'ossature est constituée par des calcaires massifs. Dès la fin de l'Oligocène (première phase alpine) l'écaillage a commencé et il a été très accentué au Miocène moyen (deuxième phase alpine).

Le réseau actif de l'Aswel est creusé par un type d'accidents formé dans le post-Miocène, où il a marqué un développement important des réseaux de fracturations verticales (Fig.2.6) (Collignon & al., 1982).

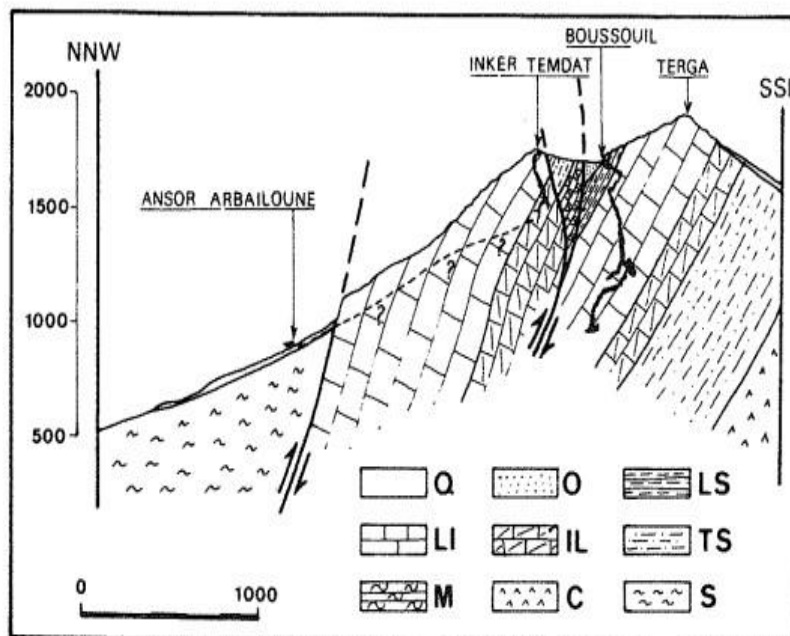


Figure 2. 6: Coupe géologique NNW-SSE à travers le Djurdjura, D'après Flandrin(1952), situation des deux gouffres d'absorption du Djurdjura (Collignon & al., 1982).

Légende :

Q : Quaternaire (éboulis de pente), O : Oligocène (gés, marnes), LS : Lias supérieure (calcaire à silex et faciès marneux rouge à ammonites), IL : Infaralias (dolomies litées), TS : Trias Supérieur (grés rouge), M : Muschel (calcaire), C : Carbonifère (schiste, psammites), S : Schiste cristallin.

2.4 Lithologie

La lithologie de cette dorsale favorise le phénomène de karstification qui se manifeste par des profondes galeries souterraines. Ainsi, il n'existe pas d'écoulement très important en surface. Les précipitations gagent les réservoirs souterrains et apparaissent généralement le long d'un plan de failles situé essentiellement sur le flanc Nord (Abdesselam, 1995; Yakoub, 1985)

La lithologie de la région est définie comme suite (Fig.2.7) :

Calcaires : Ce sont des formations caractérisées par plusieurs formes :

- Les calcaires compacts gris clair à beige parfois rosés ou dolomitiques, au Sud du bassin versant constituant les barres massives des crêtes du Djurdjura.
- Les calcaires marneux du Djurdjura.
- Les calcaires nummulitiques d'âge Eocène, représentés par le massif de la chaîne Kouriet.

Grès : on trouve :

- Les grès rouges du Trias, associés à des argiles de même couleur avec des intercalations de micro-poudingues à grains de quartz dans le Djurdjura.
- Grès et pélites, lydiennes et conglomérat du Carbonifère.

La lithologie du massif en générale :

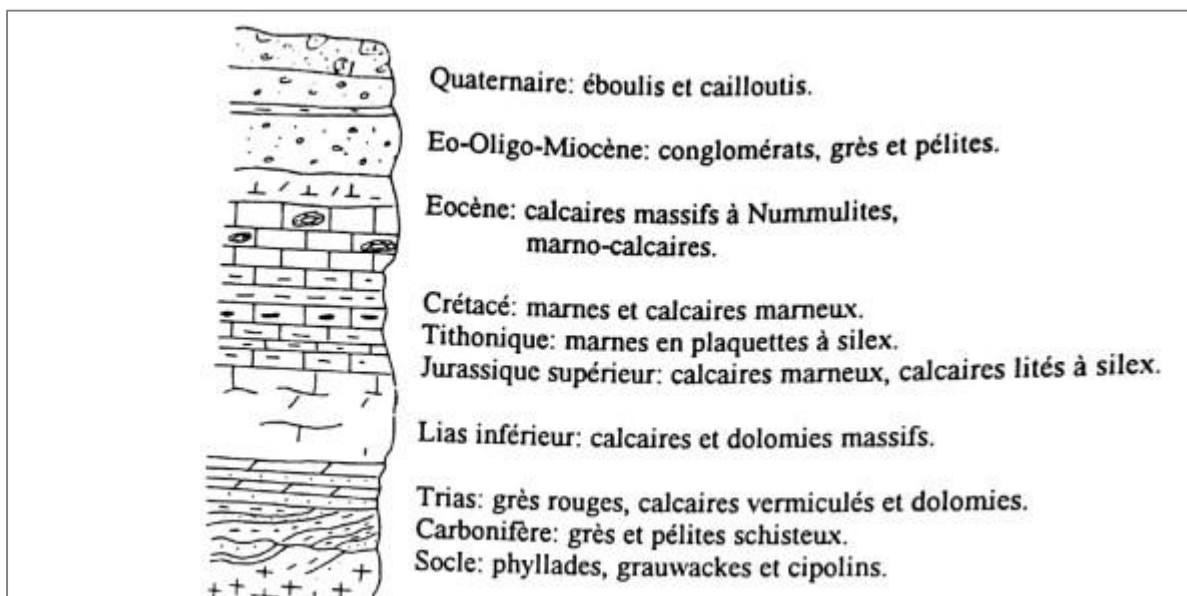


Figure 2. 7: Colonne stratigraphique synthétique du Djurdjura (Abdesselam, 1995).

2.5 Tectonique

La dorsale kabyle est une chaîne de collision ; elle est par conséquent caractérisée par 2 sortes de déformations : les déformations souples matérialisée par des plis à différentes échelles et les déformations cassantes matérialisées par de grandes failles et des contacts anormaux.

➤ **Déformations souples** : Les plis sont observés sur les formations (marne, calcaire en petit bancs) et particulièrement sur la couverture Éocène détritique. Parmi les grands plis qui forment les lignes directrices de la chaîne, on distingue :

- Les anticlinaux de Tigjda-Lalla khedidja.
- Les plis déversés vers le sud affectant le matériel flysch.
- Les cuvettes en matériel Permo-triasique ou Liasique.

➤ **Structures cassantes** : Les Contacts anormaux : qui sont des accidents de type chevauchement interprété comme des indices de structuration au jurassique et réactivé depuis plusieurs fois au Crétacé et au Tertiaire.

Les grandes failles : A l'échelle régionale, le Djurdjura est affecté de grands accidents essentiellement verticaux. Ce sont les massifs calcaires qui sont particulièrement affecté par cette technique cassante (Said, 1995). On distingue des failles d'orientation NE-SW présentent un décrochement dextre à rejet de l'ordre de 100 m et d'autres failles orienté NW-SE complémentaire qui présentent des décrochements sénestres (Figs.2.8 et 2.9).

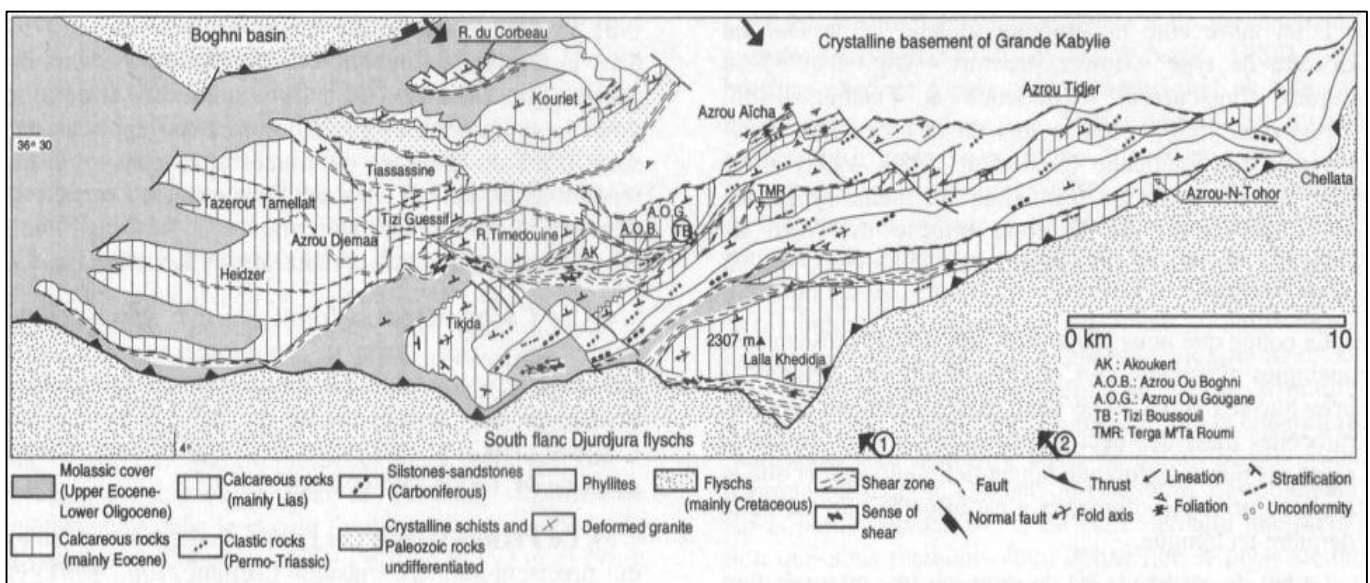


Figure 2. 8: Schéma structural de la dorsale calcaire du Djurdjura (Grande Kabylie, Algérie) (Naak, 1988).



Figure 2. 9: Photo prise d'un ensemble de faille affectée le massif.

Conclusion

Dans ce chapitre on a représenté la géomorphologie de la région de Djurdjura qui est très variable et très accidenté et fortement karstifier, et nous avons cité la localisation de notre zone d'étude plus exactement « Aswel » et avec la pratique réalisée sur le terrain on a pu illustrer et parlé sur la géologie de la région ; la lithologie qui est principalement des calcaires et des grés et même la tectonique par son échelle de déformation important et complexe.

Chapitre 03

Hydro-Climatologie

Introduction

Dans cette partie, nous analyserons les paramètres climatologiques et aussi la manière dont les différents composants du climat se comportent l'un par rapport à l'autre. La région est drainée par un important réseau hydrographique formant un chevelu dense, et principalement alimenté par les eaux pluviales et la fonte des neiges. Nous citerons par exemple Assif El Hammam et Assif Ath Boudrar qui sont des oueds d'un débit assez important, le réseau hydrographique renferme la ligne de partage des eaux entre les trois bassins versants les plus importants d'Algérie par leurs potentiels hydriques : le Sébaou (BV 02) au Nord, la Soummam au Sud et à l'Est (BV 15) et l'Isser à l'Ouest (BV 09) dont il est la source.

3.1. Description de l'aquifère karstique

Les aquifères karstiques sont hydrauliquement très hétérogènes, anisotropes et peuvent être décrits par une double porosité et une triple perméabilité. Ces caractéristiques impliquent différents types d'écoulement dans l'aquifère : (i) l'écoulement matriciel, (ii) l'écoulement de fracture-fissure, (iii) l'écoulement de conduits (Geyer & al., 2008). La lithologie, la distribution des failles, la structure et le potentiel hydraulique sont très importants pour générer et contrôler l'écoulement souterrain (Ford & Williams, 1989)

Les aquifères karstiques sont souvent caractérisés par un transport rapide grâce aux réseaux d'écoulement préférentiels dans la zone non saturée et dans la zone saturée. De plus, les écoulements en surface peuvent s'infiltrer par des formes géomorphologiques particulières, tels que des dolines ou des pertes, induisant une infiltration concentrée vers le compartiment souterrain (Fournier et al., 2007). Les vitesses de circulations dans l'aquifère karstiques sont de l'ordre de quelques mètres par heure à plusieurs centaines de mètres par heure (Geyer & al., 2008; Labat & Mangin, 2015) (Lorette, 2019).

Les eaux de pluie s'infiltrent en profondeur. Elles taraudent la masse calcaire en utilisant les zones de faiblesse, les diaclases, joints qui vont s'élargissant. Elles organisent un véritable réseau souterrain comportant des puits verticaux qui crèvent la surface du plateau de gouffres appelés avens à l'exemple du gouffre d'Aswel qui est à quelque 1700 m d'altitude, est l'un des plus accessibles et des plus importants du Djurdjura. Il se situe à 300 m au sud de la route nationale 33, il descend à une profondeur de plus de 805 m, Avec ses galeries latérales internes, son développement total est estimé à 2400 m. Les débuts de son exploration remontent aux années 1930 par les spéléologues Fourastier et Belin.

Le réseau exploré est constitué de deux parties, l'une active et l'autre inactive.

La partie active : se situe de 0 à - 800 m ;

- Un gouffre actif se développe à la faveur d'une faille perpendiculaire ;
- Très vertical, alimenté par une grande doline, ce réseau présente des crues spectaculaires ;
- Les puits, très vastes.

La partie inactive : se situe de -500 à -800m

- Un réseau beaucoup plus ancien, les galeries Obliques ;
- Une cavité creusée par les eaux thermales, réutilisée récemment par des écoulements superficiels.

Ce gouffre se situe à quelques mètres du profil tomographique réalisé dans la zone d'étude, a une particularité. En plein été, alors que le thermomètre explose au-dessus des 40°C, la température à l'entrée horizontale assez large du gouffre d'Aswel n'atteint pas les 10°C.

Pour préciser le cheminement des eaux enfouies dans la cuvette de l'anou Boussouil (environ 40 ha situés essentiellement sur des marnes oligocènes), les services de l'hydraulique ont fait en 1948 un traçage à fluorescéine (Birebent, 1953; Collignon & al., 1982).

- Point d'injection : Anou Boussouil (alt. 1700 m) ;
- Débit à la perte : 10^{-2} m³/s (avril 1948) ;
- Point d'émergence : Tala el Hammam Boudrar (alt. 740 m) ;
- Débit à l'émergence : 1 m³/s ;
- Dénivellation : 960 m ;
- Temps de parcours : 182 h ;
- Vitesse moyenne : 44 m/h.

La résurgence se fait au point bas de l'affleurement des calcaires, au niveau d'une grande faille dextre NNW-SSE qui décale l'arête de 200 m.

D'autres résurgences finissent par ressortir de ce massif, comme les sources de Tala Boudi (à Aghbalou), l'Aïncer n'Vili (à Iferhounène), l'Aïncer Aberkane (à Saharidj avec un débit allant à 400 l/s) et la phénoménale source des Aït Ouabane captée pour les besoins en eau potable et pour la production d'électricité à Souk El Had des Yatafène...(Tabeche, 2009).

3.2. Hydrologie de surface

L'hydrologie de surface, s'intéresse à la fraction de la lame d'eau précipitée sur le bassin versant et drainée par le réseau hydrographique.

Un bassin hydrographique se définit comme la surface topographique drainée par un cours d'eau et ces affluents de telle façon que tout écoulement prenant naissance à l'intérieur de cette surface suive son trajet jusqu'à l'exutoire.

Le massif montagneux du Djurdjura, par son orientation Est-Ouest, joue un rôle de barrière naturelle aux vents humides provenant du Nord-Ouest. Par conséquent, les fortes précipitations et la neige permettent de maintenir un karst fonctionnel et d'alimenter les nappes. Il représente, ainsi, un réservoir hydrologique important pour l'alimentation des oueds, des sources et des nappes aquifères d'où l'eau est puisée pour l'irrigation. Les hydrologues le qualifient de « Château d'eau » : la Kabylie étant parsemée de source d'eau potable minérale et thermo-minérale. Le Djurdjura constitue aussi la ligne des partages des eaux entre les trois bassins versants les plus importants d'Algérie par leur potentiel hydrique : le Sébaou au Nord, la Soummam au Sud et à l'Est et l'Isser à l'Ouest. Les cours d'eau prennent deux voies de migration gravitaire ; des écoulements de surface dont 8 oueds permanents et des écoulements souterrains qui donnent naissance à plus de 300 sources de résurgence (Kebbab, 2012).

3.3. Approche Hydrogéologique

3.3.1. Lithostructure et ses conséquences hydrogéologiques

L'étude de la lithostratigraphie et de la fracturation du Djurdjura permet de définir les qualités aquifères des différentes formations (Said, 1995) :

- **Cristallophyllien et le paléozoïque** : sont des séries principalement imperméables, bien que les grès et conglomérats du Carbonifère, par fracturation, permettent une porosité secondaire. De plus, les niveaux supérieurs altérés sont peu épais pour constituer des réservoirs considérables.
- **Trias** : est également étanche ; les grès sont fins cimentés ou argileux et n'admettent pas des débits importants. Les calcaires, cargneules et dolomies, très localisés, peuvent permettre des percolations souterraines dans les fissures. Cependant, ils n'ont jusqu'à nos jours jamais fournis de débits significatifs.

- **Calcaires parfois dolomités du Lias inférieur et les dolomies et cargneules de l'Infralias** : constituent les principaux aquifères de la région. Ils forment des séries importantes par leur épaisseur (200 à 400m). Les couches très redressées à la verticale et intensément diaclasées et karstifiées permettent une infiltration massive et rapide des eaux. Au sein de ces aquifères s'organisent des vides, créés par évolution des éléments structuraux sous l'action de la corrosion, qui conditionnent le séjour de la circulation de l'eau dans la masse rocheuse.
- **Lias supérieur** : abondance de la fraction argileuse (marnes) dans les faciès de cet étage diminue considérablement la porosité des formations.
- **Calcaires massifs du Tithonique** : peuvent être considérés comme aquifères au même titre que les calcaires du Lias inférieur. Cependant, leur extension est très limitée. Les autres termes de cet étage (marnes, calcaires à silex) sont très peu perméables.
- **Berriasien – Valanginien** : très argileux et peu étendu, n'offre en aucun cas des possibilités aquifères.
- **Conglomérats à ciment calcaire, les marnes et les calcaires du Sénonien** : sont peut-être étanches. Ils ne peuvent former nulle part ailleurs des réservoirs importants.
- **Lutétien** : dans les unités septentrionales, cet étage est présenté par les calcaires nummulitiques. Ils forment des aquifères potentiels à l'instar des calcaires du Lias inférieur dans les unités situées plus au sud. Cependant, sa position topographique (très élevée) et l'absence de traces de karstification intense diminuent considérablement les qualités hydrogéologiques de ce faciès. Les faciès marno-calcaires dans les massifs méridionaux, au contraire, ne sont pas aquifères.
- **L'Oligocène** : les conglomérats cimentés de calcaire de l'oligocène sont étanches et durs. Les rares sources qui "éclatent" à la base de ces terrains sont limitées aux zones fissurées.
- **Les éboulis de pente** : bien que souvent cimenté, ces éboulis présentent une porosité importante. Ceci se manifeste par de multiples sources aux pieds de ces masses rocheuses.
- **Les flyschs sud kabyle** : la série des flyschs massyliens est dépourvue de niveaux perméables. Le flysch mauritanien présente au contraire, des grès (grès de Guerrouch) datant de l'Albien et des conglomérats du Sénonien dans sa série stratigraphique. (Said, 1995)

3.3.2. Fracturation et ses conséquences hydrogéologiques

L'estimation de la perméabilité de la fracturation conditionne les phénomènes de karstification et augmente la perméabilité des terrains en surface et en profondeur. Elle conditionne, également, le séjour et la circulation des eaux dans la masse rocheuse carbonatée.

Les éléments structuraux et la fracturation du Djurdjura sont les éléments majeurs qui déterminent les conditions hydrogéologiques des réservoirs calcaires de cette chaîne. Ainsi, l'infiltration, le séjour, la circulation et l'émergence des eaux ont un rapport direct avec la nature et la position de ces tectoniques.

L'infiltration des eaux dans les calcaires est facilitée par la fracturation, souvent évoluée par suite des phénomènes de karstification. Aussi, les zones d'alimentation, correspondant aux plateaux et reliefs des massifs situés entre 1600 et 2300m d'altitude, sont parsemés de champs de lapiazs, de dépressions fermées, d'avens et de gouffres pertes par lesquels s'enfouit l'eau de pluie et de fonte de neige (Said, 1995).

3.3.3. Caractères hydrogéologiques de la recharge des aquifères

- a. **Pertes massives :** L'alimentation très localisée ce qui génère une cavité importante : ensemble puits-galeries à forte pente qui conduit rapidement l'eau dans les profondeurs du massif, cet apport d'eau est relativement ponctuel (fontes des neiges, suites d'orages violents) ils donnent naissance à des forts débits aux émergences durant une période courte.
- b. **Fonte des neiges de surface :** La neige peut être emmagasinée en assez grande quantité, leur fonte fournit des débits comparables à celui des pertes massives, bien que moins abondants. Ils restent limités dans le temps et soutiennent essentiellement des débits de crues aux émergences.
- c. **Fonte des névés souterrains :** Cette alimentation s'étale sur tout l'été et est donc différente. C'est un rapport économique primordial car fournit de l'eau durant la saison sèche (connu par les villageois du pied de montagne).
- d. **Infiltrations généralisées :** Elles concernent les précipitations qui se perdent dans les lapiazs et les dolines ; leur effet est mal appréhendé et leur étude exige l'analyse des hydrogrammes des sources en relation avec le climat.
- e. **Condensation souterraine :** Favorisé par le contraste entre les températures des cavités et celles de l'exutoire, ainsi que la circulation importante d'air dans ces cavités, elles contribuent incontestablement à l'alimentation des émergences (Quinif, 1978).

3.4. Réseau hydrographique

Le réseau hydrographique est constitué de l'ensemble des chenaux qui drainent les eaux de surface vers l'exutoire du bassin versant.

Le réseau hydrographique est très dense en grande Kabylie, le drainage s'effectue par une multitude d'oueds plus ou moins longs ; comme les Oueds de la rive gauche naissent dans le socle kabyle. Quant à l'Oued Sébaou et ses principaux affluents, ils prennent leur source dans la chaîne du Djurdjura.

3.4.1. Description des bassins versants qui regroupent le Djurdjura

Le Djurdjura est caractérisé par un réseau hydrographique très dense, il regroupe les trois bassins versants Sébaou, Isser et Soummam qui appartiennent au bassin hydrographique Algérois-Hodna-Soummam. Il est composé de trois Oueds majeurs, qui sont (Fig.3.1) :

- L'Oued Isser, qui draine la partie Ouest du territoire, prend naissance dans la Wilaya de Bouira, pour rejoindre la mer à l'Est de la Wilaya de Boumerdès.
- L'Oued Sébaou, qui draine la partie Nord et Est du territoire, autrement dit la presque totalité de la Wilaya de Tizi-Ouzou et la partie Est de la Wilaya de Boumerdès, prend sa source dans la Wilaya de Tizi-Ouzou pour se jeter à la mer au Nord-Est de la Wilaya de Boumerdès.
- L'Oued Sahel-Soummam qui draine la partie sud. du territoire (Meddour, 2012).

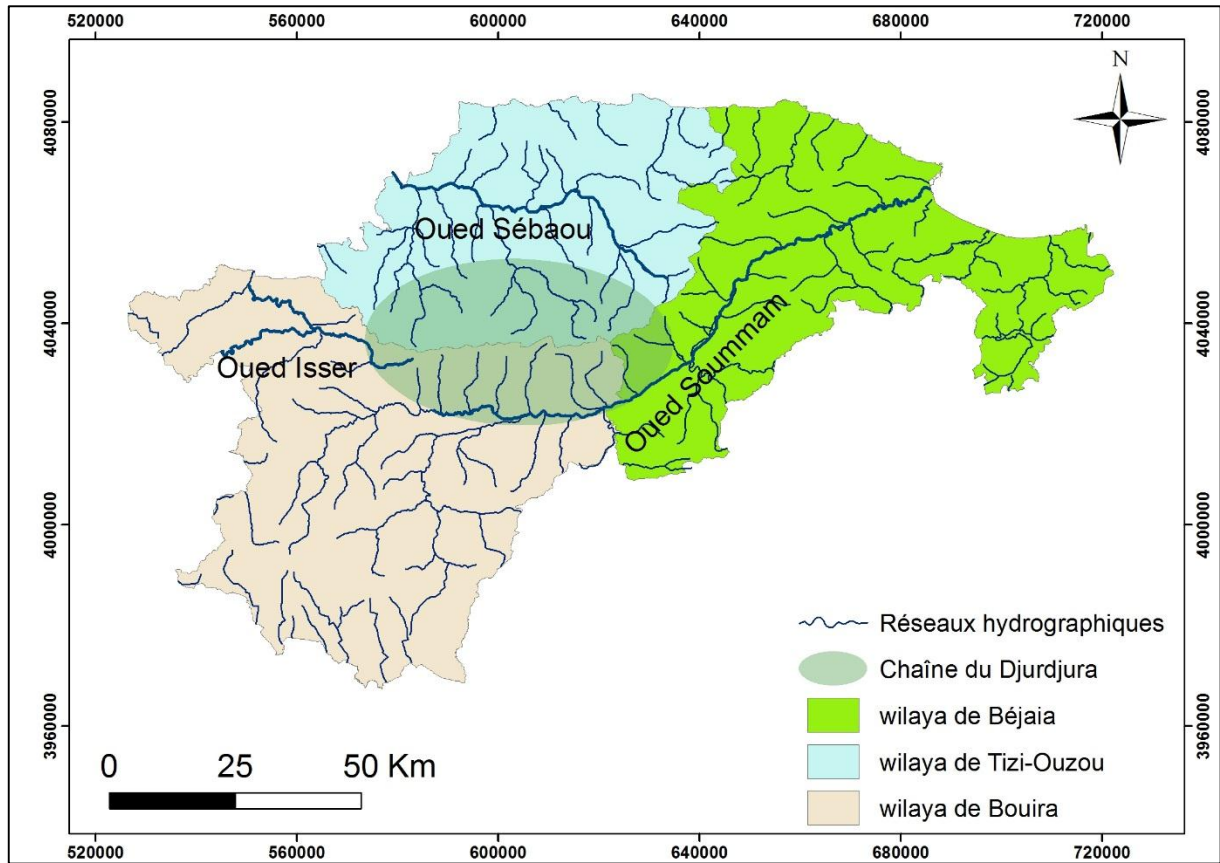


Figure 4. 1: Réseaux hydrographiques des wilayas aux quelles appartient la chaîne du Djurdjura.

3.4.2. Description du bassin versant du site d'étude

La région d'Aswel appartient au sous bassin versant Oued Aissi, qui fait partie du grand bassin versant du Sébaou lui-même raccordé aux bassins côtiers algérois de l'ABH (Algérois- Hodna-Soummam). Il répond au code 02-17, avec une superficie de 468 km². Il est limité (Fig.3.2) :

- Au Nord-Ouest par la ligne de crêtes du sous bassin versant de l'Oued Sebt (02-18), au Nord- Est par la ligne de partage des eaux avec l'Oued Rabta (02-16).
- A l'Ouest par la ligne de partage des eaux du sous bassin versant avec l'Oued Bougdoura (02-19).
- A l'Est par la ligne de partage des eaux avec le sous bassin versant de l'Oued Sébaou Amont (02-15).
- Au Sud par la ligne de crêtes de la chaine de Djurdjura.

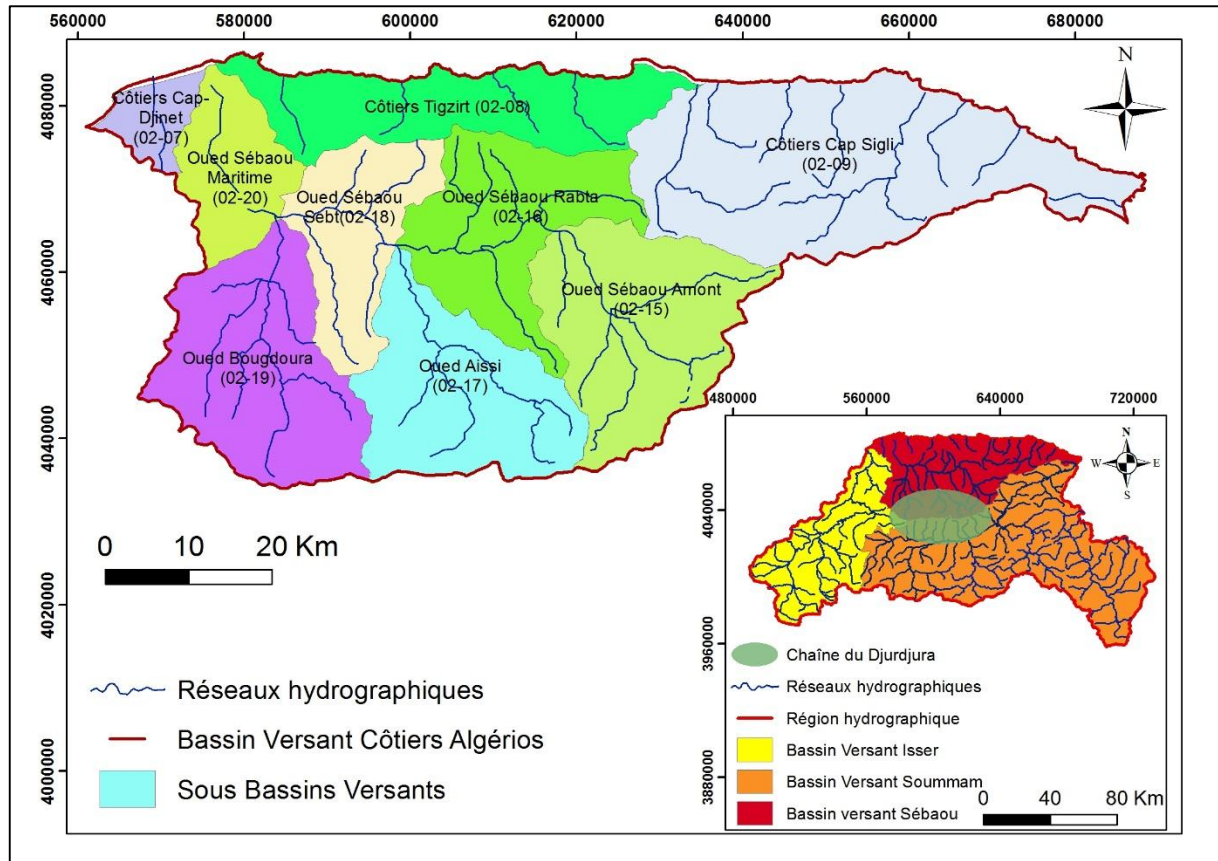


Figure 4. 2: Réseau hydrographique des sous bassins versant des bassins côtiers algériens.

3.5. Approche climatique

Deux groupes de facteurs déterminent le climat, aussi bien régional que local. Ce sont les facteurs géographiques (latitude, altitude, ...) et les facteurs météoriques liés au déplacement des masses d'air.

Le climat de la zone d'étude est contrasté et de type méditerranéen, et se trouve sous l'influence de l'anticyclone des Açores. Climat méditerranéen avec été chaud, dont on distingue deux périodes à savoir, une période sèche allant du mois de Mai au mois de Septembre et une période humide allant du mois d'Octobre au mois d'Avril (Daif, 2017). Au Djurdjura la neige persiste sur les sommets, depuis le mois de Novembre jusqu'à la fin de mois de Mai (Bourbia, 1988).

3.5.1. Climat de la Kabylie

La position géographique de la Kabylie, qui se situe tout près de la mer Méditerranée mais pas loin des régions désertiques, joue un rôle important dans la détermination de son climat. La Kabylie s'ouvre aux influences maritimes par une série de trouées et de vallées ce qui permet un adoucissement des températures en hiver et l'atténuation de l'effet de l'altitude.

Les précipitations sont abondantes pour la même saison. Les masses d'air qui arrivent du Nord dominant et déterminent une saison hivernale froide et humide qui s'étale du mois de décembre jusqu'au mois de février. La présence de la chaîne montagneuse de l'Atlas Tellien sur le flanc sud, la protège de la remontée des masses d'air chaud et sec. Durant les autres mois de l'année, les masses d'air tropical remontent progressivement et entraînent chaleur et sécheresse. En effet, l'été est chaud, sec et long. Le temps variable, fréquent sur la région, est créé par des fronts discontinus dus à la circulation zonale (d'Ouest en Est) de l'air. Les vents pluvieux du NW pénètrent jusqu'au cœur du massif ancien par la trouée du Sébaou et jusqu'au Djurdjura par la vallée inférieure de l'Isser (Belkaid, 2016).

3.5.2. Paramètres climatiques

a. Température

La température est un facteur déterminant dans l'établissement d'un bilan hydrologique, car les phénomènes de condensation et de l'évaporation sont intimement liés à ce paramètre. Elle permet, en effet, de caractériser le régime climatique d'une région (Cherifi & Laiche, 2017).

❖ Les températures moyennes annuelles

Les moyennes annuelles des températures de l'aire sont variables d'une année à une autre. Pour les données de ce paramètre les mesures relevées à la station de Tizi-Ouzou sont mises à notre disposition par l'Office Nationale de Météorologie (ONM) de Tizi-Ouzou (2012-2019).

Mois	S	O	N	D	J	F	M	A	M	J	J	A	T. Annuel
T.max	31.6	27.8	19.4	17.1	16	15.9	19	22.7	26.9	31.8	35.9	34.9	24.9
T.min	19.3	15.9	12.3	8.1	6.7	6.6	8.9	11.3	13.9	17.7	21.3	22.2	13.7
T.moy	24.6	20.9	15.1	11.8	10.6	10.5	13.4	16.3	19.4	24.4	28.2	28.3	18.6

Tableau 3. 1 : Températures moyennes mensuelles et annuelles (en degrés Celsius) de la station de Tizi-Ouzou (2012-2019) (Agrouche, 2021)(ONM Tizi-Ouzou).

La température moyenne interannuelle enregistrée à Tizi-Ouzou est de 18.6 °C. Les mois de juillet et août sont les mois les plus chauds de l'année. Leurs températures moyennes enregistrées sont respectivement 28.2 °C et 28.3 °C avec des maxima de 35.9 °C et 34.9 °C, des minima de 21.3 °C et 22.2 °C. Les mois de décembre, janvier et février sont les plus froids avec des températures moyennes respectives de 11,8 °C ; 10,6 °C et 10,5 °C, des maxima de 17.1 °C, 16°C et 15.9°C et des minima de 8.1 °C, 6.7 °C et 6.6 °C (Tab.3.1).

D'après le tableau, on constate une décroissance rapide de la température du mois de septembre au mois de février et une croissance modérée des températures est observée durant le mois de mars au mois d'août. Les mois les plus froids sont par ordre, Février, janvier et décembre. Tandis que les mois les plus chauds sont par ordre : août, juillet et septembre.

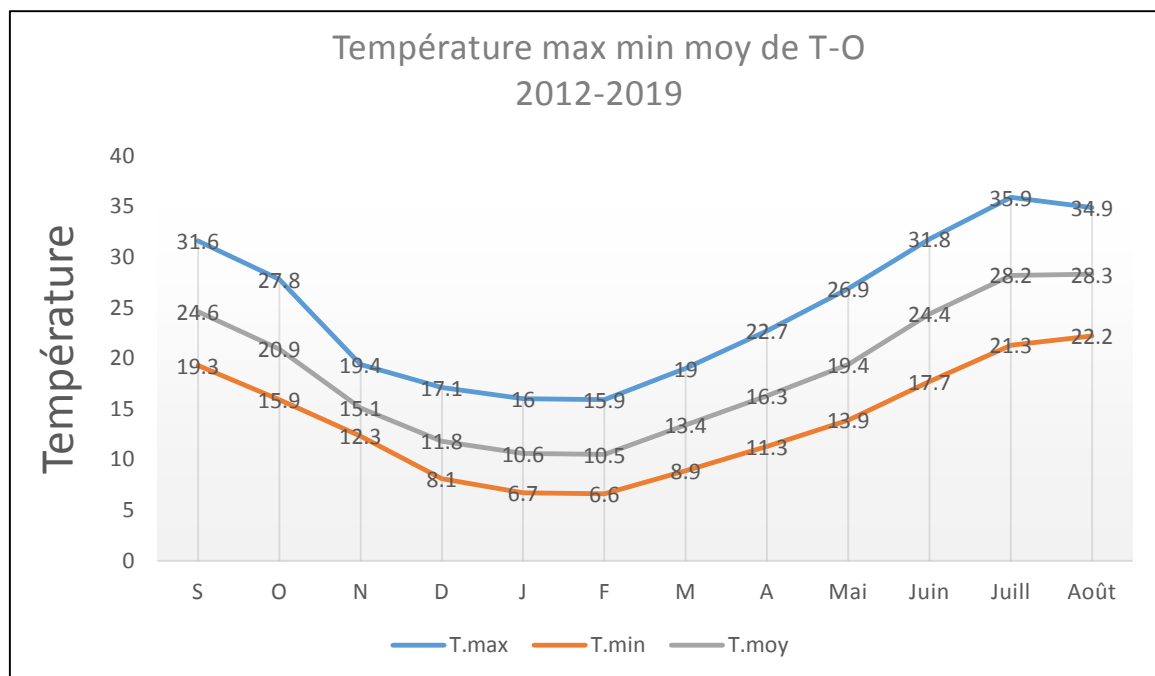


Figure 4. 3 : Evolution des températures moyennes mensuelles (°C) de Tizi-Ouzou (2012-2019).

D'après le graphique (Fig.3.3) des courbes représentatives des températures (max, min, moy) qui ont presque la même allure, on peut les subdiviser en deux intervalles :

- Du mois de février à Juillet : une croissance propre des températures ;
- Du mois de juillet à février : une décroissance des températures pour allant leur minimum au mois de février.

Aussi nous avons choisi les données relatives à la température de la station d'Ait Ouabane (Tab.3.2) comme la station la plus proche à la zone d'étude pour la période (1990-2010).

Mois	Sep.	Oct.	Nov.	Dés.	Jan.	Fév.	mars	avril	mai	Juin	Juil.	août
T. Max (C°)	29	20.6	13.1	10.3	5.5	10.4	15.2	17.3	20.8	26.8	32.1	31
T. Min (C°)	20.2	15.4	9.9	7.02	2.4	7.3	10	12.2	15.7	20.8	25.6	24.9
T. mensuels (C°)	24.6	18	11.5	8.7	3.9	8.9	12.6	14.8	18.3	23.8	28.9	28.0

Tableau 3. 2 : Températures maximales, minimales et moyennes mensuelles de la station d'Ait Ouabane (1990-2010) (Kebbab, 2012) (ONM Tizi-Ouzou).

Le tableau 3.2 montre que la température mensuelle la plus élevée pour la station d'Ait Ouabane (1990-2010) est de 32.1 °C au mois de juillet qui représente, ainsi, le mois le plus chaud. La température mensuelle la plus faible est de 2.4 °C enregistrée au mois de Janvier, qui symbolise le mois le plus froid de l'année. Par conséquent, l'écart est de 29.7°C.

b. Précipitations

Les précipitations constituent la composante fondamentale de l'hydrologie et la connaissance de cet apport d'eau au sol est essentielle pour appréhender l'état des réserves en eau du sol, la recharge des nappes et le régime des cours d'eau. Selon (Seltzer, 1946), les pluies en Algérie sont d'origine orographique et torrentielle, elles varient avec l'altitude et sont inégalement réparties durant l'année et variables d'une année à une autre.

❖ Précipitations dans le Djurdjura

Le Djurdjura est l'une des 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). Les précipitations peuvent varier considérablement d'une année à une autre et les neiges peuvent être abondantes sur le Djurdjura et l'extrémité orientale du massif central (Belkaid, 2016).

Les précipitations ont lieu principalement sous forme de pluie et de neige. Les principales périodes de précipitation sont comprises entre novembre et 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'à mai (Amiri & Bekdouche, 2015).

Les précipitations sont réparties sur deux saisons :

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

Pour mieux caractériser ce paramètre dans la région d'étude, nous avons choisi trois stations pluviométrique ; Aït Ouabane la plus proche à la zone d'étude, Beni Yenni qui se situe dans le même bassin versant et la station de Tizi Ouzou comme une station de référence, systématiquement réparties sur la surface du bassin versant couvrant une période de 30 ans (1990-2019). Les différentes caractéristiques relatives à ces stations sont regroupées dans le tableau 3.3.

Stations pluviométriques	Code (ANRH)	Coordonnées Lambert		Altitudes (m)	Période de fonctionnement
		X (km)	Y (km)		
Aït Ouabane	021716	643.3	354.7	960	1990-Actuel
Beni Yenni	021712	635	365.25	760	1990-2020
Tizi-Ouzou	021810	617.89	381.50	195	1990-2020

Tableau 3. 3: Caractéristiques des stations pluviométriques utilisées (ANRH)

Année	Tizi-Ouzou	Ait Ouabane	Beni Yenni	Année	Tizi-Ouzou	Ait Ouabane	Beni Yenni
1990	755.6	1377.7	842.8	2005	732.6	1393.6	754.2
1991	766.6	1113.2	725.6	2006	793.1	1265.6	698.2
1992	689.3	898.6	702	2007	931.6	1393.6	955.5
1993	551.3	955.4	618.9	2008	1010.8	1265.6	1185.8
1994	865	1259.9	922.5	2009	963.8	1110.3	925.8
1995	822.8	1287.8	890.8	2010	1016.6	1265.6	1113.2
1996	500	809.5	505.5	2011	1033.9	1110.3	1023.9
1997	1113.2	1711.8	1192.3	2012	936.8	609.6	980.9
1998	689.5	1168.3	768.4	2013	835.2	553.1	922.2
1999	556.4	880.7	624.2	2014	969.4	1465.5	1068.1
2000	606.9	1100	785.3	2015	772.1	1211.7	811.2
2001	461.8	798.2	479.6	2016	618.7	432.5	680.7
2002	1217.5	766	1366.5	2017	947.8	615.8	968.9
2003	832.6	551.6	903.6	2018	634.3	441.3	614.7
2004	696.3	1124.6	879.5	2019	639.8	444.2	688.1

Tableau 3. 4: Précipitation annuelle (mm) des trois stations pour la série d’observation (1990-2019) (Agrouche, 2021; ANRH).

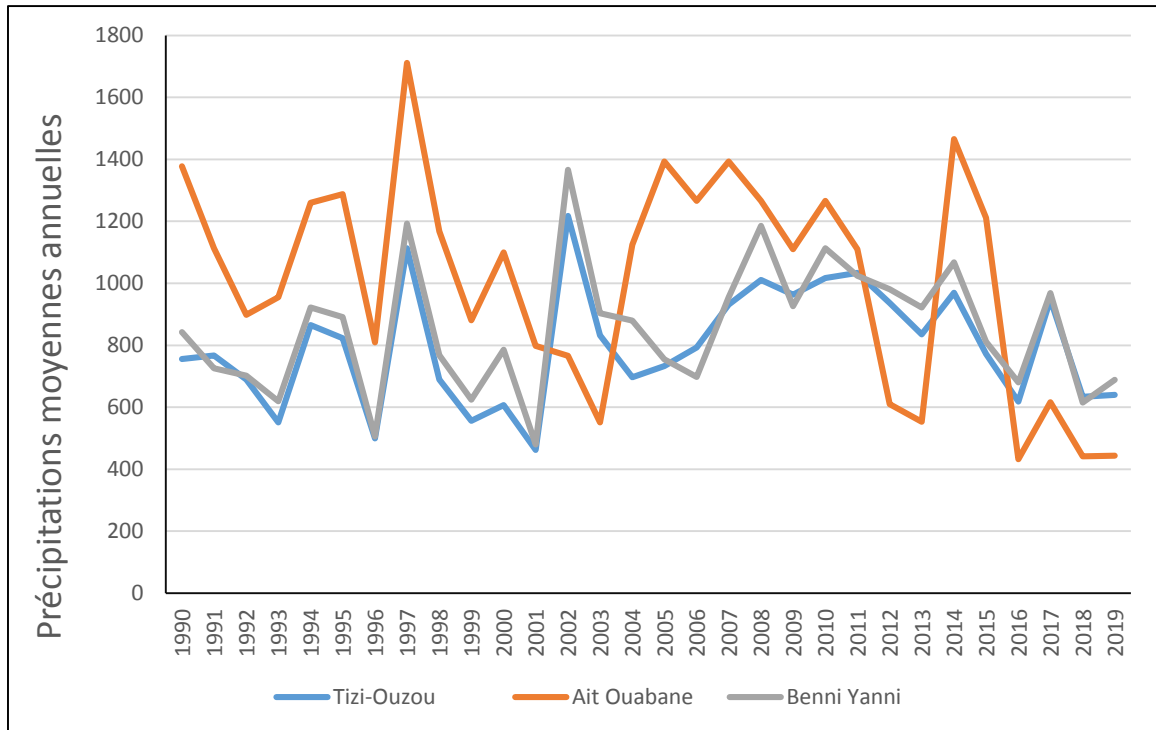


Figure 4. 4: Variation interannuelle des précipitations moyennes annuelles (1990-2019).

La figure 3. 4 établit à partir des données pluviométriques enregistrées au niveau des stations Tizi-Ouzou et Beni Yenni montre que les variations interannuelles des précipitations durant la période s'étalant depuis 1990 à 2019 sont assez concordantes, contrairement aux valeurs pluviométriques enregistrées dans la station de Ait Ouabane qui est plus importante.

Les apports en quantité de pluie annuelle ont enregistré une nette augmentation qui ont atteint 1711.8 mm en 1996/1997 pour la station Ait Ouabane tandis que la valeur minimale remarqué en 2016 (432.5mm).

La valeur maximale des précipitations est observée à la station de Tizi-Ouzou durant la période 2001/2002 égale à (1217.5 mm) et (1366.5mm) pour la station de Beni Yenni pendant la même période tandis que la valeur minimale remarqué en 2001 avec (461.8mm) pour la station de Tizi-Ouzou et (479.6mm) pour la station de Beni Yenni (Tab.3.4).

Précipitations (mm)	Sept	Oct	Nov	Déc	Janv	Févr	Mars	Avril	Mai	Juin	Juil	Août	Annuel
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	464.8
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

Tableau 3. 5: Moyennes mensuelles des précipitations de la station de la station Tizi-Ouzou pour la période 1984/1985-2018/2019 (Agrouche, 2021)ANRH).

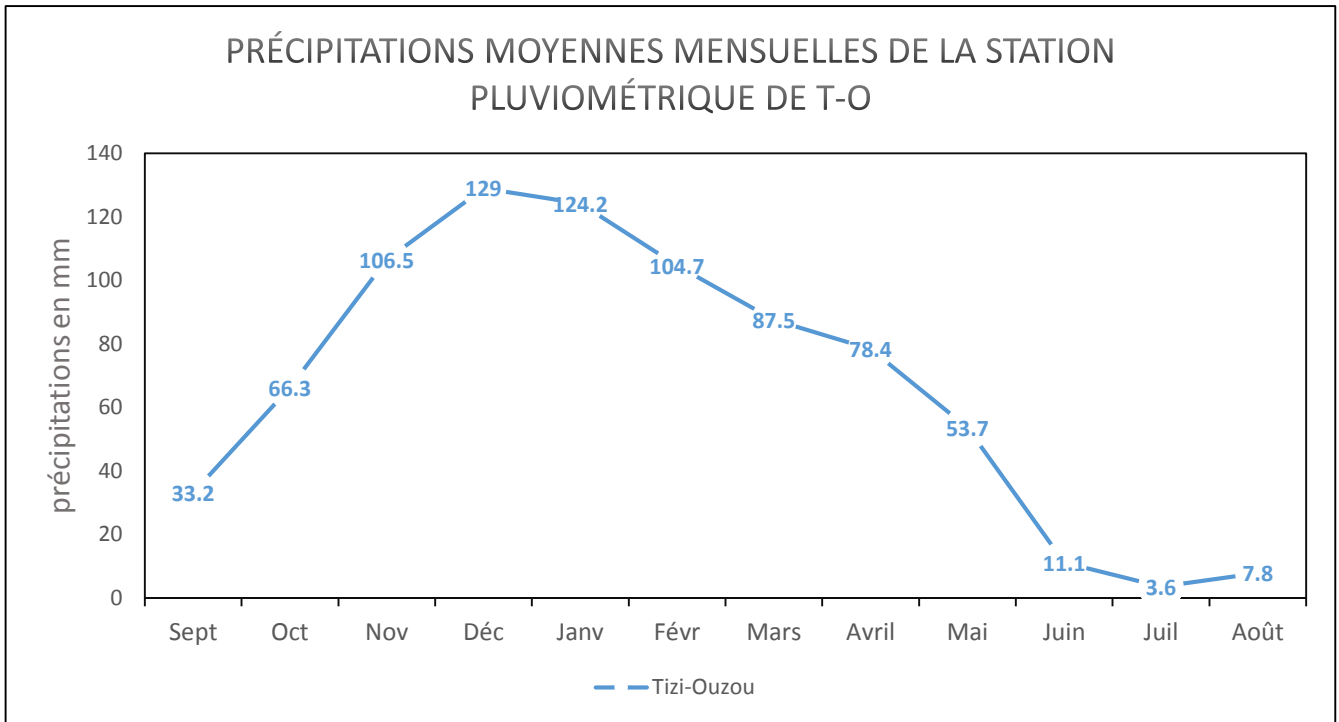


Figure 4. 5: Evaluation des précipitations moyenne mensuelles à la station de Tizi-Ouzou (1984/2019).

Le bassin versant de la grande Kabylie, jouie d'un climat méditerranéen, dont on distingue deux périodes à savoir, une période humide allant du mois d'octobre au mois d'avril, et le reste des mois de l'année les pluies sont rares à exceptionnelles (période sèche).

L'évolution des précipitations à la station de Tizi-Ouzou montre bien ces deux périodes, donc les précipitations sont réparties sur deux saisons :

- Une saison pluvieuse humide s'étalant du mois d'octobre à avril avec un maximum de la moyenne enregistré au mois de décembre avec (129mm/mois),
- Une saison sèche s'étalant du mois de mai au mois de septembre avec un minimum de la moyenne au mois de juillet (3.6mm/mois).

c. Humidité relative de l'air

Appelée aussi état hygrométrique, c'est le rapport en centièmes, de l'humidité absolue vraie à l'humidité absolue saturante, à la même température et la même pression (Pagney, 1973). C'est un élément atmosphérique très important puisqu'il donne le taux de condensation de l'atmosphère (Louda, 2016).

Le tableau 3.6 et la figure 3.6 ci-dessous représentent les valeurs moyennes mensuelles en % de l'humidité relative pour la période (2012-2019) de la station météo de Tizi Ouzou.

Mois	S	O	N	D	J	F	M	A	M	J	J	A
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

Tableau 3. 6: Humidité relative moyenne mensuelle en % de la station de Tizi-Ouzou, période (2012-2019) (Kaci-moussa & Moali, 2019).

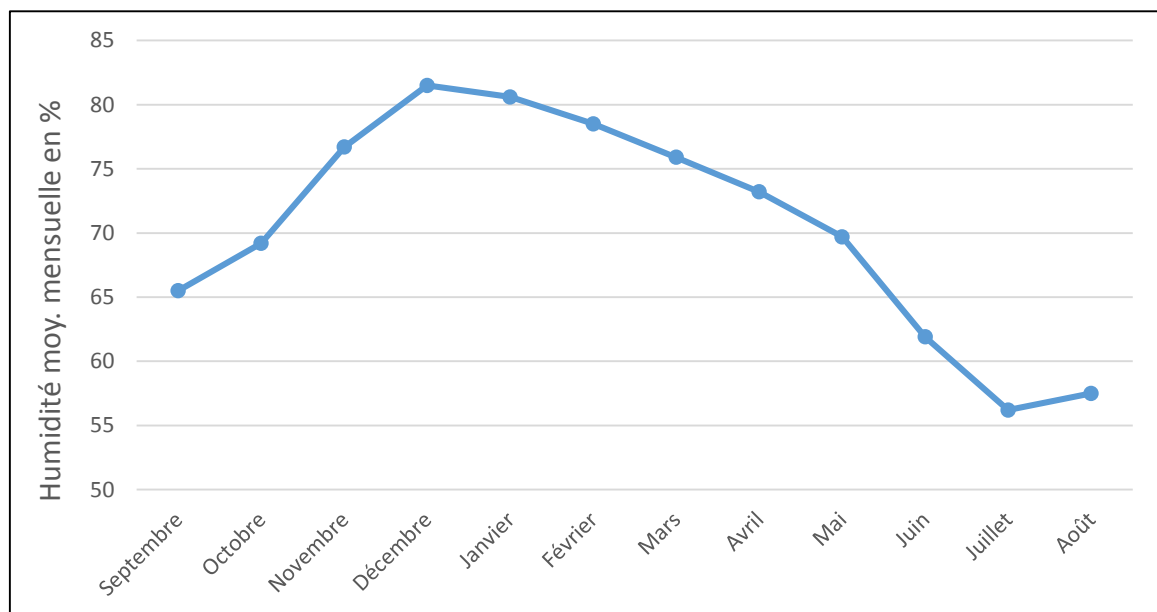


Figure 4. 6: Variation de l'humidité moyenne relative en % de la station de T.O. période (2012-2019).

Le tableau 3.6 et la figure 3.6 ci-dessus indique une humidité relative moyenne de l'air pour la période 2012-2019. Sur un autre plan, ces résultats montrent que l'humidité de l'air est relativement faible à partir du mois de mai jusqu'au mois de septembre avec un minimum de 56.2% et 57.5% aux mois de juillet et Août ; ce qui correspond aux valeurs extrêmes de température (air

sec), et sensiblement élevée du mois d'octobre jusqu'au mois de mai, caractérisant la saison humide avec un maximum de 81.5% et 80.6% aux mois de décembre et Janvier.

A l'échelle de l'année, on constate que l'humidité relative moyenne mensuelle est toujours supérieure à 56.2 % et est de 70.5% en moyenne annuelle. Elle augmente à partir du mois de Septembre à Janvier puis diminue pour atteindre le minimum au mois de juillet.

d. Vent

Une région donnée se caractérise souvent par les fréquences forces et directions des vents dominants (Djemai, 1985). Les vents d'altitude sont modifiés dans leurs directions et intensités du fait du relief, de la rugosité et des effets thermiques. Le Djurdjura constitue une barrière aux vents chauds. Son versant sud y est plus exposé tout comme aux rayons du soleil (Abdesselam, 1995). Aussi qui arrêtent les vents humides qui viens de la méditerranée.

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.

Vitesse des vents	Sept	Oct	Nov	Dés	Jan	Fév	Mars	Avril	Mai	Juin	Juil	Août
2015/2016	2.8	2.3	1.7	1.4	2.2	2.5	2.5	2.1	2.7	2.5	2.8	2.5
2016/2017	1.8	1.7	1.5	0.9	1.5	2.2	2.1	2.2	2.2	2.7	2.4	2.9
2017/2018	2	1.2	1	1	1.5	0.8	1.9	1.2	0.7	0.3	1.2	1.9
2018/2019	1.6	1.3	1.3	0.8	2.9	1.8	1.6	2.2	2.1	2.9	3.3	2.3
2015/2019	2.05	1.6	1.7	1.02	2	1.8	2.02	1.9	1.9	2.1	2.4	2.4

Tableau 3. 7: Vitesse des vents en m/s de la station de Tizi Ouzou pour la période de 2015- 2019

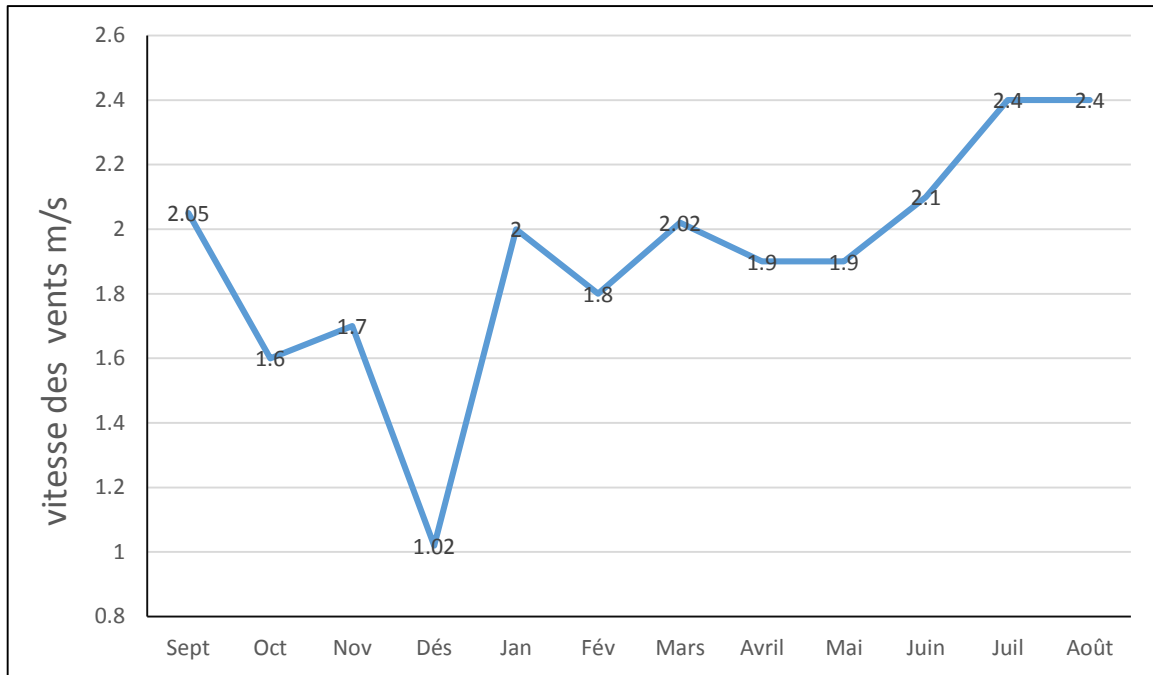


Figure 4. 7: Variation de la vitesse des vents moyenne 2015/2019 en m/s de la station de Tizi-Ouzou.

La force du vent est estimée à partir d'une échelle télégraphique (Beaufort), comme suivant :

0-1 : vent calme, 1-2 : vent faible, 2-3 : vent modéré, 5-6 : vent assez fort, 7-8 : vent fort, >9 : vent violent.

Le tableau 3.7 et figure 3.7 ci-dessous présentent les valeurs des vents pour la station météo de Tizi Ouzou pour la période (2015/2019). Les vitesses moyennes des vents extrêmes sont respectivement 2.4m/s pour juillet et août, et 1.02m/s pour le mois de décembre comme la vitesse moyenne des vents faibles.

3.6. Aperçu hydrochimique

L'étude hydrochimique a pour but de comprendre les mécanismes d'alimentation de l'aquifère et de déterminer les faciès des eaux des différentes sources. La connaissance détaillée de la chimie des eaux permettra également de mieux les utiliser en particulier en irrigation et en alimentation en eau potable.

Les infiltrations concentrées et les transferts rapides dans l'aquifère conduisent à des changements rapides de la chimie de l'eau, et par conséquent de la qualité de l'eau à l'exutoire des systèmes karstiques après des événements pluvieux ((Mahler & Lynch, 1999).

La composition chimique des eaux des sources est majoritairement acquise lors de la traversée du sol et de son séjour dans le réservoir. L'eau, au contact de l'encaissant, acquiert une charge minérale caractéristique des roches traversées. Les produits évacués en suspension et en solution sont informatifs sur la nature de l'aquifère traversé et leurs extensions.

Au massif du Djurdjura et en période de crue, le faciès devient bicarbonaté calcique, permet de distinguer deux types d'eau : les eaux du karst profond à faciès chloruré-sodique reconnu en étiage, et celles des niveaux plus superficiels à caractère bicarbonaté calcique (Abdesselam & al., 2000).

3.7. Couvert végétal

Le couvert végétal joue un rôle extrêmement important, dans la protection des sols contre l'érosion par son action atténuante des crues et des averses particulières, en réduisant et en freinant le ruissellement superficiel (Benhassaine, 1980).

Sur les flancs du Djurdjura la végétation est constituée de forêts très denses qui est dominée par le cèdre, le genêt, le frêne, le chêne liège et de maquis qui rend l'accès très difficile. Dont l'altitude est comprise entre 1000 et 1600 mètres là où les grès et les schistes occupent l'essentiel des affleurements géologiques. Parmi la végétation introduite par l'homme, on citera l'olivier et le figuier.

Conclusion

Les calcaires du Lias et de l'éocène au Djurdjura sont compris entre des terrains beaucoup moins perméable (grés de Trias, marno-calcaires du Lias supérieur). D'une écaille à l'autre, il n'y a donc pas de communication hydrogéologique évidente et chaque lambeau calcaire peut constituer une unité aquifère. Les quelques traçages réalisés (Birebent, 1953) indiquent que les transits sont rapides. A l'enfouissement dans des réseaux subverticaux (aux réponses presque instantanées) succède un drainage par des conduits de faible pente et de grosse section parallèles aux écailles (WSW/ENE). Ces derniers conduits sont peut-être hérités de phase de karstification antérieure.

Le Djurdjura est soumis à un climat méditerranéen humide de montagne. L'essentiel des précipitations tombe de novembre à avril, une grande partie sous forme de neige au-dessus de 1500 mètres. Le printemps est riche en crue de dégel et les redoux hivernaux sont fréquents. Les orages d'été sont rares et peu intense. L'altitude n'est pas suffisante pour que se forment de véritables glaciers, mais quelques névés souterrains persistent toute l'année et leur fonte soutient le débit d'étiage des sources.

Dans cette région de montagnes, les précipitations et les températures sont régies par l'altitude et l'exposition des versants. On observe une augmentation de la pluviosité avec l'élévation de l'altitude avec un gradient 60 mm/100 m en altitude. Le gradient thermique est de $-0,6\text{ °C}/100\text{m}$.

Pratiquement la totalité des précipitations alimente l'écoulement de surface et l'infiltration à travers le karst, la part de l'évaporation étant très faible.

Les eaux du karst profond sont à faciès chloruré-sodique avec un second faciès bicarbonaté-calcaïque pour les eaux superficielles.

CHAPITRE 04

Tomographie de résistivité électrique

Introduction

En prospection géophysique, les méthodes électriques sont couramment utilisées pour l'imagerie de subsurface. Il existe plusieurs techniques de mesure sur terrain et elles reposent toutes sur les mêmes fondements physiques. Nous aborderons ici, plus particulièrement, la technique de la tomographie de résistivité électrique (TRE) ou Electrical Resistivity Tomography (ERT). Elle vise à déterminer la distribution des résistivités électriques verticalement et horizontalement le long d'un profil. Notons que les contrastes de résistivité doivent être suffisants pour que les hétérogénéités soient détectables sur le terrain.

4.1. Résistivité électrique

Par définition, la résistivité (ρ) d'un milieu est le paramètre physique qui détermine l'aptitude de ce milieu à s'opposer au passage du courant électrique. Elle est définie aussi comme la résistance électrique du milieu par unité de longueur. Si l'on considère par exemple un échantillon de sol, de longueur L (m) et de section A (m²), disposé entre deux plaques conductrices, reliées à un générateur délivrant un courant électrique d'intensité I (A) et de tension électrique U (V), la résistivité de l'échantillon ρ ($\Omega \cdot m$) est alors définie par l'équation 1 (Fig.4.1)(Audebert, 2015):

$$\rho = \frac{AU}{LI} \quad (1)$$

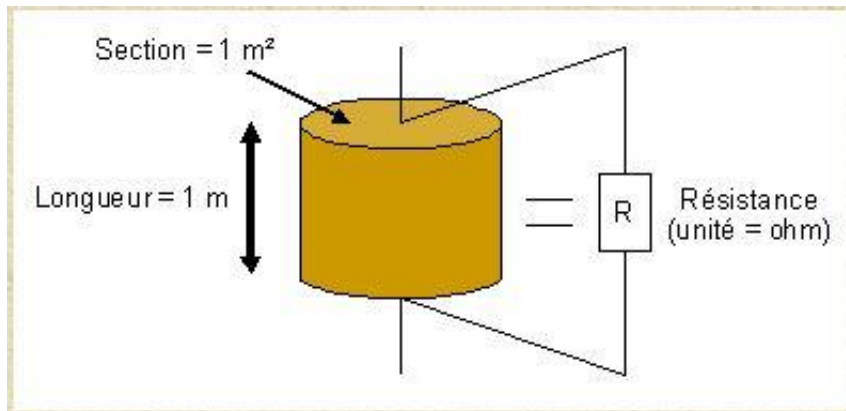


Figure 4. 8: Schéma explicatif de la résistivité électrique ρ en fonction de A et L .

Une autre relation empirique est fréquemment utilisée pour relier les différents paramètres de terrain est donnée par la loi d'Archie (1942) :

$$\rho_r = \rho_w a \Phi^{-m} S_w^{-n} \quad (2)$$

Avec ;

ρ_r : la résistivité de la roche ;

ρ_w : la résistivité de l'eau d'imbibition ;

Φ : la porosité ;

a : facteur qui dépend de la lithologie et qui varie entre 0,6 et 2 ($a < 1$ pour les roches à porosité intergranulaire et $a > 1$ pour les roches à porosité de fracture) ;

m : facteur de cimentation qui dépend de la forme des pores et de la compaction. Il varie entre 1,3 pour les sables non consolidés à 2,2 pour les calcaires cimentés ;

S_w : saturation en eau de la roche ;

n : exposant variant très peu avec les formations, sa valeur est d'environ 2 pour la plupart des formations de porosité normale dont la teneur en eau est comprise en 20% et 100% (Laurent Marescot, 2004).

Les valeurs des résistivités des formations géologiques couvrent un large domaine (Fig.4.2).

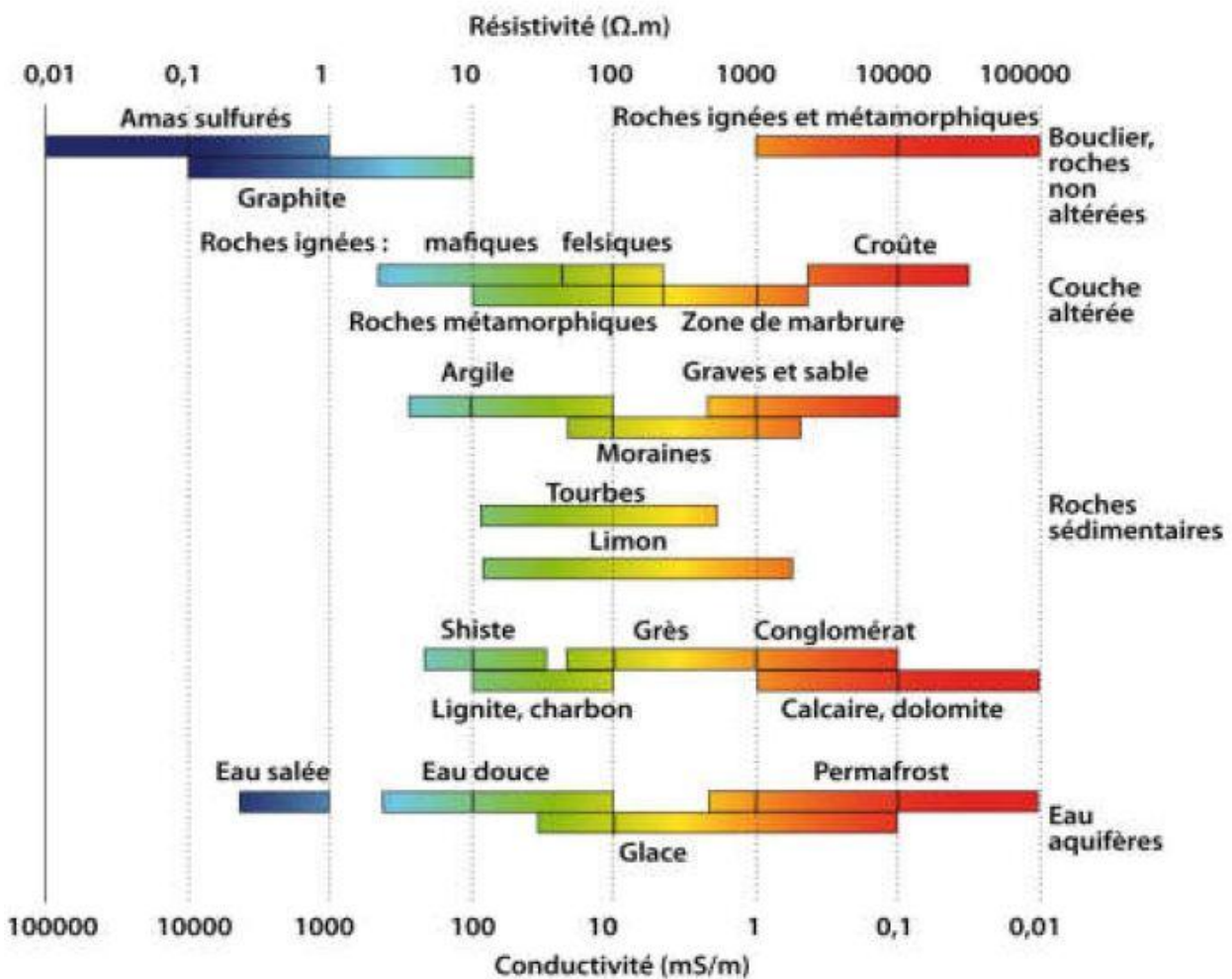


Figure 4.2: Gamme des résistivités couramment rencontrées en prospection géophysique (Fauchard & al., 2004).

La conductivité électrique (σ) est l'inverse de la résistivité ($\sigma=1/\rho$). Un matériau conduit d'autant mieux le courant électrique que sa résistivité est faible (ou sa conductivité élevée). En hydrogéologie on emploie le plus souvent le micro-siemens/centimètre ($\mu\text{S/cm}$).

$$\rho (\Omega.m) = 10^4 / \sigma (\mu\text{S/cm})$$

4.2. Paramètres influençant la résistivité

Pour la plupart des roches, la circulation du courant électrique est de type électrolytique ; les ions transportent des charges, sous l'effet du champ électrique, grâce à l'eau qu'elles contiennent. La résistivité d'une roche dépend de :

- **La porosité totale** : deux milieux complètement saturés en eau, avec des valeurs de porosité différentes, n'auront pas la même résistivité. Dans les travaux de (Besson & al., 2004) ont montré que lorsque la densité d'un matériau augmente, la résistivité décroît de façon non linéaire (Audebert, 2015).

- **La teneur en eau** : une augmentation de la teneur en eau induit généralement une diminution de la résistivité (Audebert, 2015).

- **La température** : une augmentation de la température induit une diminution de la résistivité (Audebert, 2015).

- **La conductivité électrique de la solution** : la conductivité d'un sol saturé est proportionnelle à la conductivité de l'eau contenue dans les pores (Archie, 1942). Elle dépend de la concentration en ions et de la mobilité des ions en solution. Plusieurs études ont montré que la résistivité est directement proportionnelle à la conductivité de la solution. Lorsque la teneur en sel de la solution d'imbibition diminue, la résistivité de l'échantillon augmente (Audebert, 2015; Gupta & Hanks, 1972; Waxman & Smits, 1968).

4.3. Tomographie de résistivité électrique

La tomographie de résistivité électrique (TRE), issue du sondage électrique et du traîné électrique, est une nouvelle technique de prospection géo-électrique en courant continu, apparue à la fin des années 1980. Elle permet d'obtenir un modèle de résistivité du sous-sol où la distribution de la résistivité varie verticalement, horizontalement le long du profil (cas 2D), et parfois transversalement (cas 3D). Elle est aussi caractérisée par une bonne sensibilité, à la fois, verticale

et horizontale. Cette méthode connaît une importante progression grâce au développement récent d'appareils d'acquisition et de codes d'inversion (Loke & Barker, 1996a,1996b)(Aissaoui, 2020).

4.3.1. Principe d'acquisition

Le principe de la méthode repose sur la mesure de différences de potentiel électrique associées à l'injection d'un courant électrique. La loi d'Ohm permet de calculer la résistivité électrique apparente. Cette valeur résulte de la contribution de toutes les portions du milieu qui sont traversées par le courant émis en surface. Ainsi, la mesure représente une valeur qui intègre les résistivités sur un certain volume du sous-sol. La technique d'acquisition consiste à réaliser des profils en augmentant régulièrement l'espace entre les électrodes. Les mesures de terrain permettent ainsi d'obtenir une pseudo-section de la résistivité électrique apparente du sous-sol (Fig.4.3).

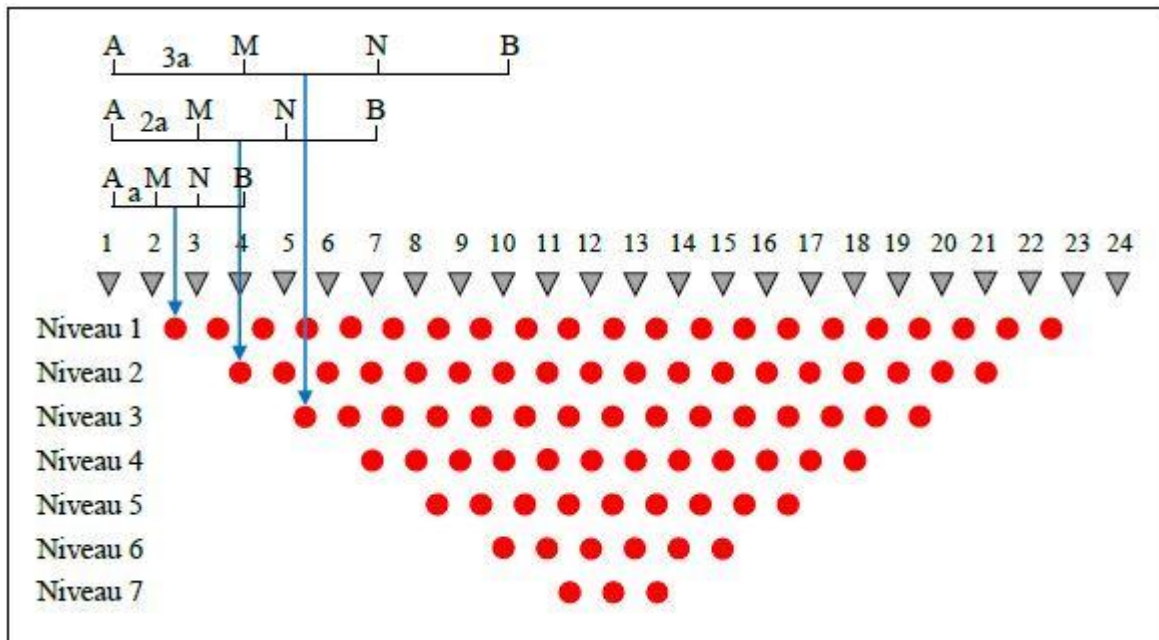


Figure 4. 3 :Principe de la tomographie électrique 2D (Aissaoui, 2020).

A et B deux électrodes d'injection du courant, M et N à la mesure de potentiel (électrodes de réceptions), a la distance entre deux électrodes.

L'acquisition est constitué de N électrodes séparées d'une distance a . Chaque quadrupôle permet d'acquérir un point de mesure ; plus l'espace inter-électrode est grand, plus la profondeur d'investigation augmente(Portal, 2015).L'ensemble de ces mesures représente un profil de résistivités apparentes 2D, appelés pseudo-section où les coordonnées horizontales représentent la position du centre du dispositif le long du profil et les coordonnées verticales représentent la

profondeur d'investigation. L'échelle des couleurs est proportionnelle à la valeur de la résistivité. Cette pseudo-section ne peut pas être interprétée directement vu les hétérogénéités de terrain.

Pour reconstituer la répartition des résistivités vraies dans le sous-sol, à partir des résistivités apparentes, on fait appel au processus de l'inversion (Aissaoui, 2020; Fauchard & al., 2004).

4.3.2. Dispositifs de mesure

Plusieurs dispositifs de mesure de la résistivité électrique peuvent être utilisés sur terrain. Le principe d'acquisition est le même pour tous les dispositifs mais leurs profondeurs d'investigation varient d'un dispositif à l'autre et elle dépend aussi de leurs longueurs. On citera ici les dispositifs les plus utilisés :

- **Wenner** : Ce dispositif est très recommandé pour les structures horizontales. Sa profondeur d'investigation ainsi que le nombre de points de mesures sont inférieurs à celui du Dipôle-Dipôle et du Wenner-Schlumberger. Le manque de points de mesure se fait sentir surtout sur les bords de la tomographie (Fig.4.4) (<https://www-ig.unil.ch>).

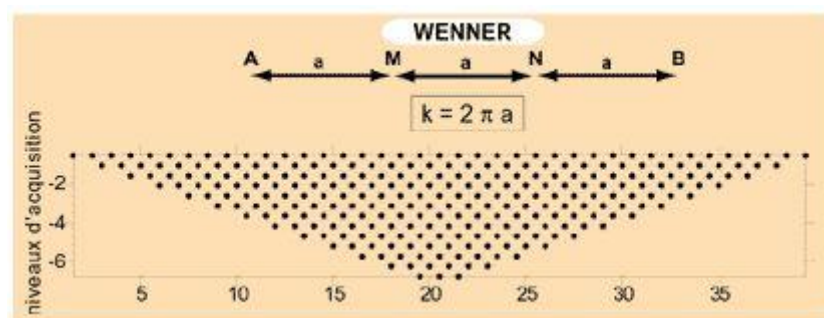


Figure 4. 4: Représentation des électrodes et points de mesures pour le dispositif Wenner (avec a = distance inter-électrode et k = facteur géométrique) (<https://www-ig.unil.ch>).

- **Wenner-Schlumberger** : Ce dispositif est conseillé à la fois pour les structures horizontales et verticales. Sa profondeur d'investigation est d'environ 10 % plus élevée qu'avec le Wenner. Le nombre de points de mesure est plus grand que pour le Wenner mais inférieur à celui du Dipôle-Dipôle (Fig.4. 5) (<https://www-ig.unil.ch>).

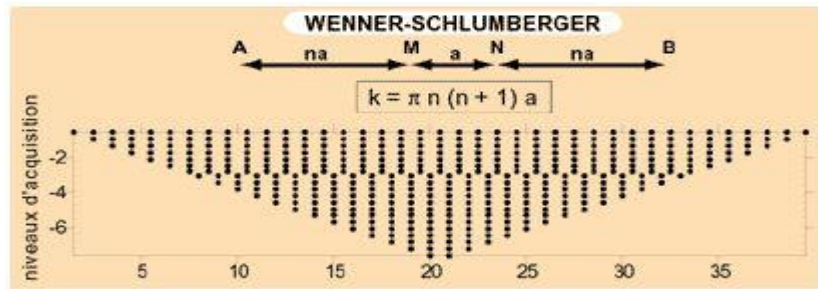


Figure 4. 9 : Représentation des électrodes et points de mesures pour le dispositif Wenner-Schlumberger (avec a = distance inter-électrode, n : niveau d'enregistrement et k = facteur géométrique) (<https://www-ig.unil.ch>).

- **Dipôle-Dipôle** : Ce dispositif est recommandé surtout pour les structures verticales. Sa profondeur d'investigation ainsi que le nombre de points de mesures sont supérieurs à celui de Wenner et Wenner-Schlumberger. Il nécessite des appareils sensibles et un bon couplage des électrodes avec le sol. Il est très utilisé aussi pour la 3D avec des grilles de 12 x 12 électrodes (Fig.4. 6) (<https://www-ig.unil.ch>).

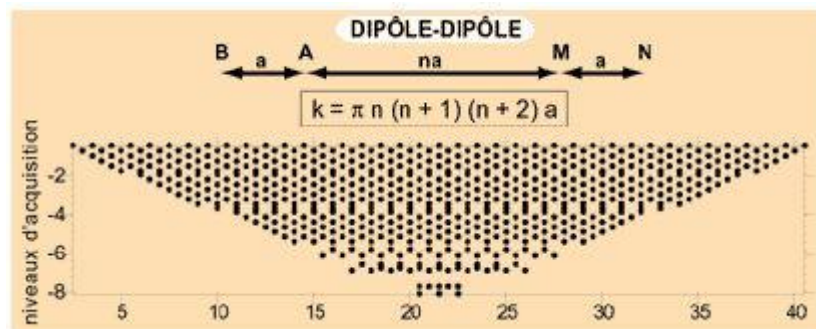


Figure 4.6: Représentation des électrodes et points de mesures pour le dispositif Dipôle-Dipôle (avec a = distance inter-électrode, n : niveau d'enregistrement et k = facteur géométrique) (<https://www-ig.unil.ch>).

- **Pôle-Pôle** : Ce dispositif est caractérisé par une très grande profondeur d'investigation mais une faible résolution. Il est très sensible au bruit et nécessite de mettre deux électrodes à l'infini. Il est très utilisé en 3D car il a un grand nombre de points de mesure (<https://www-ig.unil.ch>).

4.3.3. Choix du dispositif sur le terrain

Le dispositif Wenner-Schlumberger est mieux utilisé en présence d'un terrain bruité et sans aucune connaissance préalable de la géométrie de l'objet à étudier. Ce dispositif est utilisé en recherche géologique à grande échelle, en hydrogéologie, en génie-civil, en archéologie et pour des problèmes d'environnement.

Le dispositif dipôle-dipôle est recommandé dans la recherche des structures verticales dans une zone qui n'est pas trop bruitée. A condition d'avoir un résistivimètre très sensible et a un bon contact entre l'électrode et le sol. Ce dispositif est utilisé en archéologie, en géophysique minière et en génie-civil.

Le dispositif Wenner est recommandé dans la recherche des structures horizontales dans une zone qui n'est pas trop bruitée. Enfin, généralement en 3D, on utilise le dispositif pôle-pôle ou Dipôle-Dipôle (<https://www-ig.unil.ch>).

4.3.4. Domaines d'application

Ces dernières années, la tomographie de résistivité électrique est devenue un outil important de prospection géophysique. Elle est très utilisée dans :

Géologie structurale : déterminer les structures géologiques complexes (Bedrosian & al., 2012) ;

Industrie minière : imager les zones riches en minerais (Legault, 2008) ;

Hydrologie : étudier l'infiltration de polluants dans le sol et les processus de recharge des aquifères (Descloîtres & al., 2008) ;

Environnement : caractériser les sites et les sols pollués aux hydrocarbures afin de protéger les aquifères (Legault, 2008);

Hydrogéologiques : cartographier les ressources en eau et détecter les migrations d'eau salée dans les sols (Descloîtres & al., 2008);

Agronomie : étudier le lien entre les variations de la résistivité et les variations de la teneur en eau dans les sols, dues aux infiltrations et à l'évapotranspiration (Blondel, 2014);

Glissements de terrain : déterminer les fragilités dues aux infiltrations susceptibles de déstabiliser les massifs (Hibert, 2012);

Génie civil : ausculter des structures (Fargier, 2011);

Archéologie : conserver le patrimoine historique (Xu & al., 2015) ;

Géothermie : étudier des systèmes hydrothermaux (Portal, 2015).

4.4. Modélisation géo-électrique (problème direct)

La modélisation est un outil qui a pour but de réaliser des scénarios en définissant le modèle de distribution des résistivités vraies, de tester les différents paramètres d'acquisition, d'évaluer le modèle de résistivités interprétées par rapport au modèle de résistivités vraies, de tester les paramètres d'inversion et le maillage. Le problème direct correspond au processus permettant le calcul du champ de potentiel électrique généré par une ou plusieurs sources de courant en tout point d'un modèle de résistivité. La discrétisation du milieu étudié en sous-domaines appelés « mailles » est nécessaire lors de la résolution du problème direct. Le calcul de minimisation de la fonctionnelle est réalisé sur les nœuds composant le modèle (Fig.4.7)(Fargier, 2011).

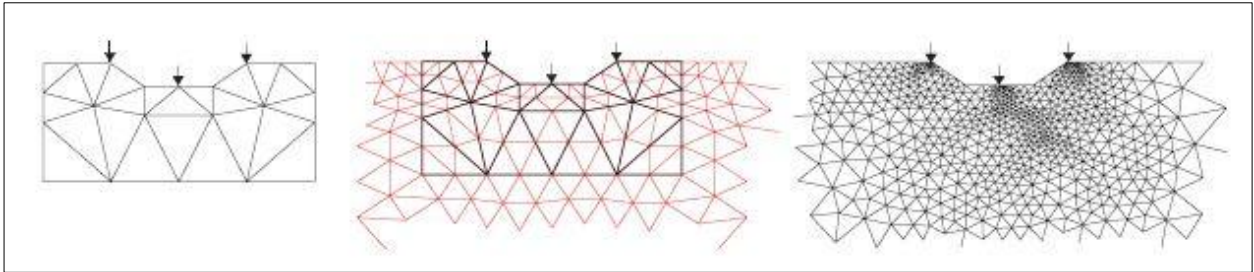


Figure 4. 10: Illustration du principe du calcul du problème direct par la création de trois grilles [Günther et al.,2006]. La première grille est utilisée afin de définir les paramètres du modèle inversé, la seconde grille permet le calcul de la partie régulière du potentiel et la dernière grille (la plus fine) permet la résolution de la partie singulière du potentiel électrique.(Fargier, 2011).

4.5. Inversion géo-électrique (problème inverse)

L'inversion est un procédé de calcul utilisé pour remonter aux caractéristiques inconnues du terrain à partir de réponses mesurées. Il consiste à représenter la zone étudiée par un modèle de résistivités interprétées. Le but est de retrouver les épaisseurs et les résistivités interprétées des différents corps en présence (Portal, 2015). Le processus d'inversion est basé sur la mesure d'une « distance » entre les données mesurées et les données simulées, sur un modèle reconstruit à chaque étape de l'inversion. L'opérateur permettant de mesurer une distance est appelé la norme.

Le problème direct est un passage nécessaire pour résoudre le problème inverse. De plus, la résolution du problème inverse nécessite de répéter un certain nombre de fois le calcul du problème direct. En conséquence, la résolution du problème direct est un point clé nécessitant une attention particulière (Fargier, 2011).

Un des problèmes majeurs de l'inversion est la non-unicité de la solution. En effet, un nombre infini de modèles peuvent minimiser la fonction objective de manière identique. L'inversion ERT est un problème « mal-conditionné » qui mène à l'instabilité de la solution. Un problème « mal-conditionné » est caractérisé par le fait qu'un faible changement dans les données (par exemple, une faible variation du bruit) peut engendrer de fortes variations dans les résultats du modèle. Pour stabiliser le processus d'inversion, on utilise généralement une méthode de régularisation (Tikhonov & Arsenin, 1977). La régularisation consiste à ajouter certaines contraintes, qui permettent d'introduire des « amortissements » dans la méthode, engendrant l'équation d'inversion suivante (Audebert, 2015):

$$(S^T S + \lambda I) \Delta \mathbf{m} = S^T \mathbf{r}$$

λ : paramètre de régularisation

I : la matrice identité.

\mathbf{r} : la différence entre les données mesurées et la réponse du modèle direct $f(\mathbf{m})$; $\mathbf{r} = \mathbf{d} - f(\mathbf{m})$

$\Delta \mathbf{m}$: vecteur de changement des paramètres

S : matrice de sensibilité S

Conclusion

Dans ce chapitre on a pu représenter les principes généraux de la tomographie électrique, et distinguer le meilleur dispositif qui convient pour chaque nature de terrain afin d'avoir des résultats proches de la réalité, de bonne résolution et atteindre les profondeurs voulues. En résumé, le dispositif Wenner est recommandé pour les structures horizontales, le Dipôle-Dipôle pour les structures verticales et le Wenner-Schlumberger pour les structures verticales et horizontales.

La maîtrise du problème direct et inverse pendant les étapes d'inversion donne un modèle plus fiable et plus proche de la réalité et minimise les erreurs d'interprétation.

Chapitre 05

Modélisation géo- électrique synthétique

Introduction

Le traitement des données en géophysique passe souvent par la méthode d'inversion permettant d'obtenir une meilleure idée des paramètres étudiés (L Marescot, 2008). Nous avons réalisé une simulation par Res2Dmod les pseudo-sections pour des différents dispositifs afin d'identifier les structures souterraines. Ensuite on a passé à l'inversion par Res2Dinv, pour choisir le meilleur dispositif et la meilleure méthode qui s'approche plus à la réalité.

5.1. Aperçu sur les logiciels utilisés

Res2dmod

Res2dmod est un programme de modélisation directe qui calcule la pseudo section de résistivité apparente pour un modèle de sous-surface 2D défini par l'utilisateur.

Res2dinv

Res2Dinv est un logiciel d'inversion 2D qui détermine un modèle de résistivités vraies à partir des données de résistivités apparentes mesurées sur le terrain. Il prend en charge la visualisation des pseudo sections mesurées, calculées et inversées. Il peut gérer les données de n'importe quel dispositif d'électrodes, y compris Wenner (alpha, beta, gamma), dipôle-dipôle, pôle-dipôle en ligne, pôle-pôle et Wenner-Schlumberger (<https://landviser.com/software/res2dinv/>).

Ce logiciel est capable d'inverser un grand nombre de données. Le modèle 2D utilisé par le programme d'inversion divise automatiquement la pseudo-section en blocs rectangulaires autour des points de mesure (Loke & al, 1996, 2003). La taille des blocs augmente avec la profondeur, car la résolution diminue en profondeur. La topographie doit être prise en compte dans l'inversion car son influence n'est pas négligeable.

Le processus d'inversion a besoin d'un nombre d'itérations entre trois à cinq itérations. Ce n'est pas forcément le profil qui a le plus grand nombre d'itérations qui est le modèle géologique le plus juste (Loke, 2007). Res2Dinv détermine à partir de la pseudo-section de résistivités apparentes mesurées une pseudo-section de résistivités apparentes calculées à partir de laquelle il associe à chaque bloc du modèle une valeur de résistivité vraie (Fig.5.1). L'erreur de mesure a des effets plus ou moins sur la résolution et la fiabilité de la technique de tomographie de résistivité. Afin de la réaliser avec succès, il faut que toutes les erreurs doivent être prise en compte et même la topographie doit être prise en compte aussi (Hebbache, 2017).

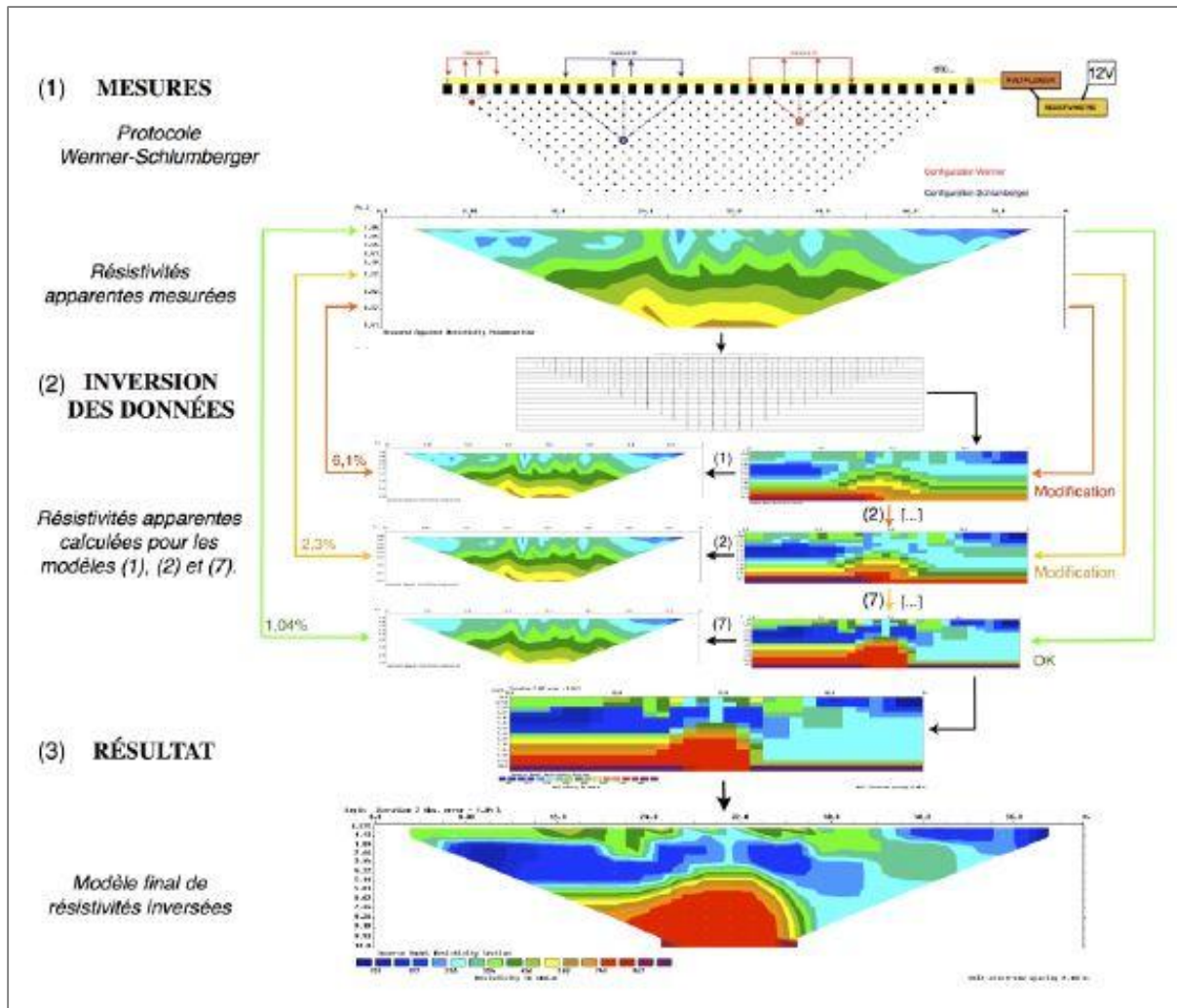


Figure 5. 1: Figure du processus d'inversion dans res2dinv.

5.2. Simulation de pseudo-sections sous forme d'un rectangle selon la profondeur

Pour tester la possibilité d'identifier les structures souterraines, comme pour notre exemple les cavités souterraines à l'aide de mesures électriques, nous avons simulé par Res2Dmod, les pseudo-sections pour différents dispositifs au-dessus des cavités souterraines résistantes ayant une forme rectangulaire.

Cas de profondeur superficielle

La cavité modélisée dans la présente étude est de forme rectangulaire dont les dimensions sont les suivantes : 2 m de hauteur et 6 m d'extension latérale, avec une valeur de résistivité de 100 $\Omega \cdot m$. Tandis que, le milieu encaissant (milieu homogène) a une résistivité de 10 $\Omega \cdot m$. La position de la cavité est située au centre du profil ($x = 31 m$) et à 1m de profondeur (Figs.5.2 et 5.3). Un dispositif

de 64 électrodes espacées de 1 m pour améliorer la résolution, a été utilisé pour les différents dispositifs de mesures : Wenner alpha, Wenner Beta, Wenner gamma, Pôle-Pôle, Dipôle-Dipôle, Pôle- dipôle et Wenner-Schlumberger.

La modélisation de la cavité a été réalisée avec le code de modélisation Res2Dmod (Ver 3.03.06). La méthode des différences finies a été choisie pour calculer les résistivités. Les valeurs obtenues de la résistivité apparente de ce modèle synthétique ont été simulées sans incorporation de relief et sans bruit. L'inversion de modèle a été réalisée par le code d'inversion le plus utilisé Res2Dinv (Ver 3.56.22), en utilisant les options mode « Least square inversion » (Fig.5.2) et mode « Robust inversion » (Fig.5.3).

On compare les résultats d'inversion obtenus sur les figures 5.1 et 5.2 on conclut que la méthode d'inversion robuste est la plus adaptée pour la détection des cavités. Elle permet de préserver les discontinuités. Dans tous ce qui suit, on a choisi de faire l'inversion avec cette méthode.

Pour ce premier modèle, tous les dispositifs (Fig.5.3) ont indiqué raisonnablement la géométrie de la cavité, mais il y a une différence dans la position. Le Dipôle-dipôle est le seul dispositif qui a indiqué la position exacte de la cavité. Les 2 autres dispositifs Pôle-Pôle et Pôle- dipôle ont indiqué approximativement la position mais avec une résolution moins précise. En réalité, le choix idéal de dispositif d'acquisition électrique dépend aussi de la géométrie de la cavité et de la distance inter-électrodes. Dans notre cas, cette distance ne pose pas de problème car les dimensions de la cavité est 6 fois plus grande que la distance inter-électrodes. Le nombre d'itérations varie de 3 à 4 et l'erreur RMS est comprise entre 0,39 à 0,64 %.

Cas de profondeur intermédiaire

Les caractéristiques de la cavité modélisée sont les mêmes que la précédente sauf qu'elle est située à 3m de profondeur. Pour ce modèle aussi, tous les dispositifs (Fig.5.4) ont indiqué raisonnablement la géométrie de la cavité, mais il y a une différence dans la position soit latéralement où verticalement. Le Dipôle-dipôle est le seul dispositif qui a indiqué la position exacte de cette cavité. On remarque aussi que Wenner-Schlumberger a indiqué approximativement cette position. Dans tous les modèles d'inversion, la convergence est atteinte au niveau de la deuxième itération et l'erreur RMS est comprise entre 0,44 à 0,88 %.

On aussi réaliser des cas à des profondeurs profondes et les résultats dans l'ensemble se ressemblent au cas précédent, une forme détectée par tous les dispositifs mais décalé pour la plus part. L'échelle de résistivité obtenue est beaucoup plus faible par rapport à la valeur de la cavité ce qui mène à bien choisir le contraste de résistivité de la cavité et de l'encaissant.

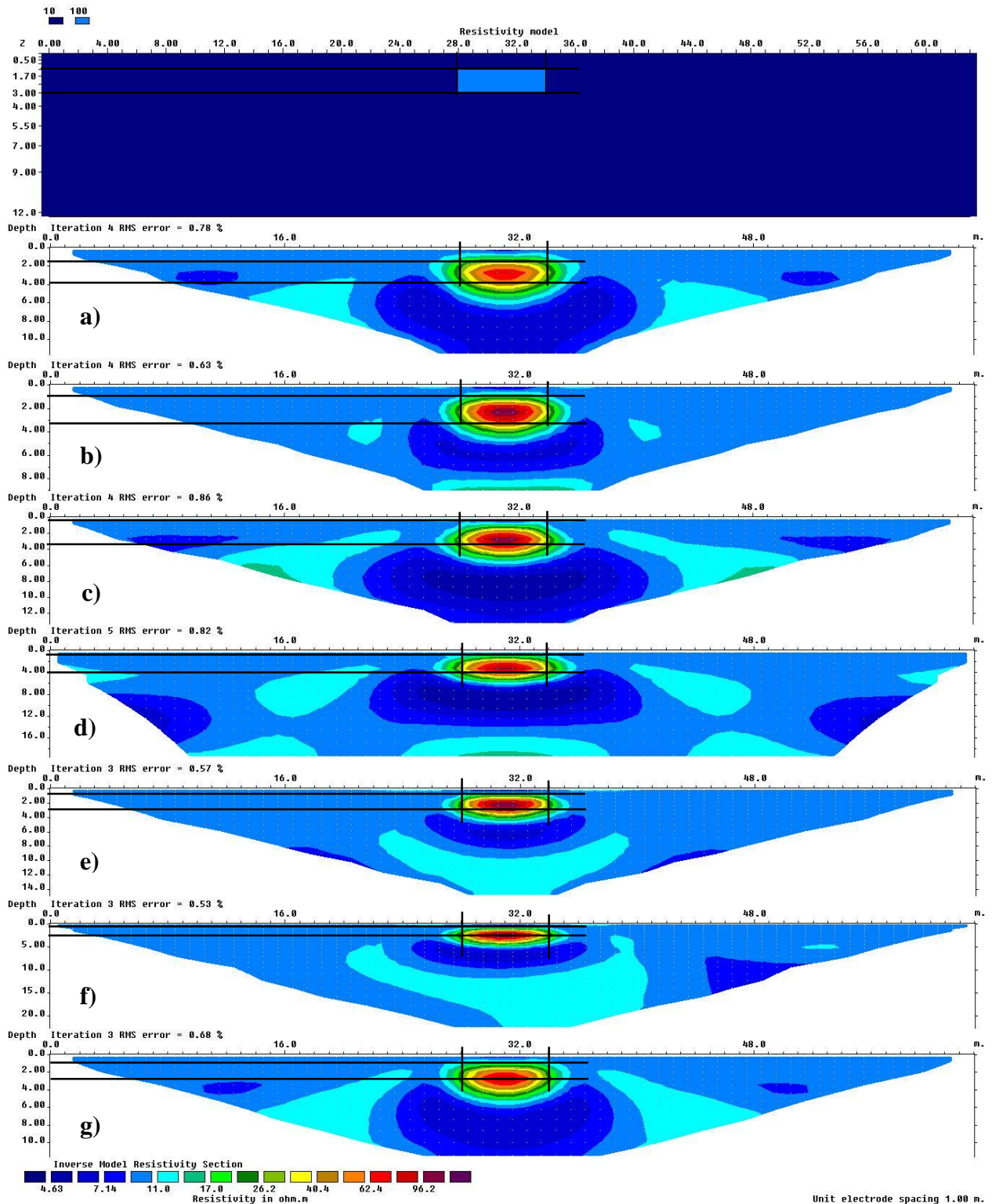


Figure 5. 2 : En haut : modèle géo-électrique synthétiques modélisés avec Res2Dmod représente une cavité de 2m de haut sous une couche de 1 m d'épaisseur. En bas : comparaison de l'inversion des résultats du modèle direct avec la norme L2 pour quatre dispositifs d'acquisition TRE suivant : a) Wenner Alpha, b) Wenner Beta, c) Wenner Gamma, d) Pôle-pôle, e) Dipôle-dipôle, f) Pôle-Dipôle et g) Wenner-Schlumberger.

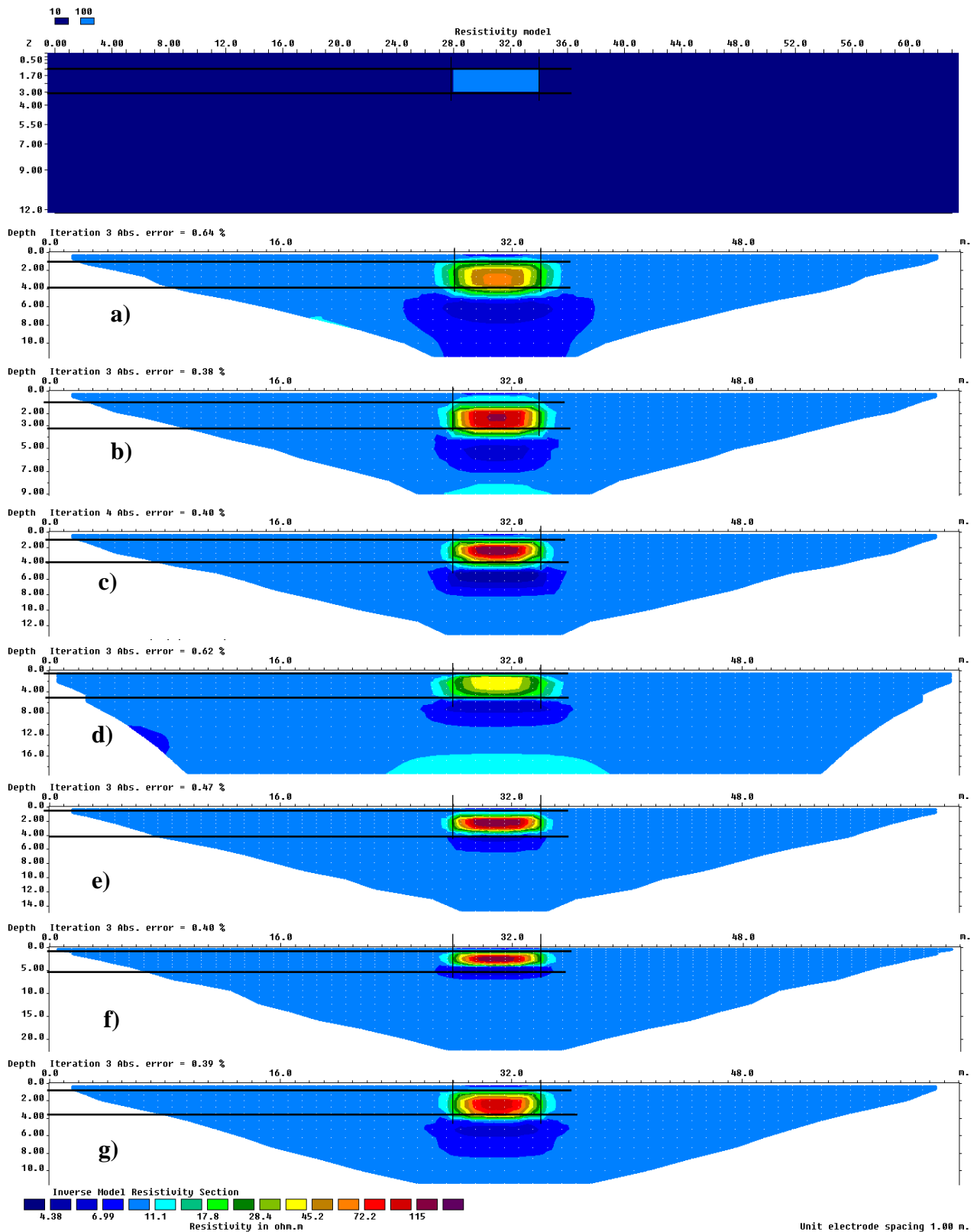


Figure 5. 3: En haut : modèle géo-électrique synthétiques modélisés avec Res2Dmod représente une cavité de 2 m de haut à une profondeur de 1 m. En bas : comparaison de l'inversion des résultats du modèle direct avec la méthode robuste pour les dispositifs d'acquisition TRE suivant : a) Wenner Alpha, b) Wenner Beta, c) Wenner Gamma, d) Pôle-pôle, e) Dipôle-dipôle, f) Pôle-Dipôle et g) Wenner-Schlumberger.

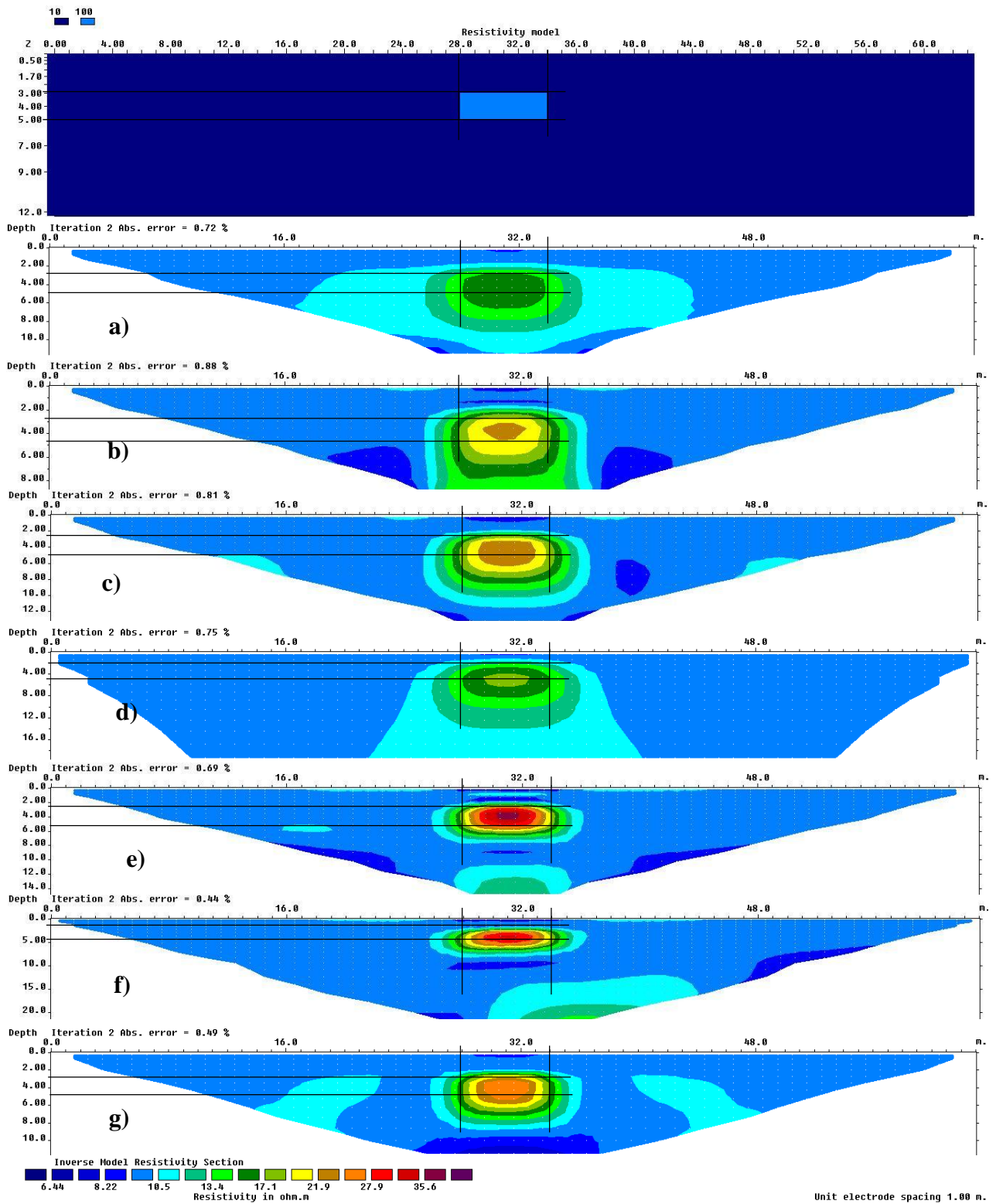


Figure 5. 4: En haut : modèle géo-électrique synthétiques modélisés avec Res2Dmod représente une cavité de 2 m de haut à une profondeur de 3 m. En bas : comparaison de l'inversion des résultats du modèle direct avec la méthode robuste pour les dispositifs d'acquisition TRE suivant : a) Wenner Alpha, b) Wenner Beta, c) Wenner Gamma, d) Pôle-pôle, e) Dipôle-dipôle, f) Pôle-Dipôle et g) Wenner-Schlumberger

5.3. Influence de la distance inter-électrode sur la détection des cavités

Cas 1 : La longueur de l'anomalie égale à la distance inter-électrode

Pour ce premier modèle, la forme modélisée est d'une épaisseur de 7m et d'une longueur de 5m qu'est égale à la distance inter-électrode. L'inversion de modèle a été réalisée en utilisant la méthode d'inversion robuste. Les dispositifs testés sont Wenner alpha, Pôle-Pôle, Dipôle-Dipôle et Wenner-Schlumberger. Les résultats de l'inversion (Fig.5.5) montrent que le Dipôle-Dipôle est le seul dispositif qui a indiqué la position et la géométrie exacte de la cavité. Le Wenner-Schlumberger a indiqué une forme qui ressemble à la cavité mais les dimensions et leurs positions ne sont pas exactes. Par contre le Wenner alpha et le Pôle-Pôle ne sont pas adaptés à la détection des anomalies dont leurs longueurs sont égales à la distance inter-électrode.

Cas 2 : La longueur de l'anomalie égale à la moitié de la distance inter-électrode

Pour ce deuxième modèle, La forme modélisée dans ce cas est d'une épaisseur de 8m et d'une longueur de 2.5m qu'est égale à la moitié de la distance inter-électrode (5m). La même méthode d'inversion de modèle et les mêmes dispositifs qui sont testés dans le cas 1. Les résultats de l'inversion (Fig.5.6) sont dans l'ensemble les mêmes que le cas précédent.

Cas 3 : La longueur de l'anomalie égale à un quart de la distance inter-électrode

Pour ce deuxième modèle, La forme modélisée dans ce cas est d'une épaisseur de 8m et d'une longueur de 1.25m qu'est égale à un quart de la distance inter-électrode (5m). La même méthode d'inversion de modèle et les mêmes dispositifs qui sont testés dans le cas 1. Les résultats de l'inversion (Fig.5.7) montrent que le Dipôle-dipôle est le seul dispositif qui a indiqué la géométrie et la position exacte de la cavité. Les autres dispositifs Wenner alpha, Pôle-Pôle et Wenner-Schlumberger ne sont pas adaptés à la détection des anomalies dont leurs longueurs sont trop petites par rapport à la distance inter-électrode.

Dans les 3 cas précédent, l'échelle de résistivités vrai calculé à partir de résistivités apparente simulé sur le logiciel ne reflète pas la réalité du modèle qu'on a supposé (résistivité de la cavité et l'encaissant) car elles sont influencées par les grandes épaisseurs des couches en profondeur.

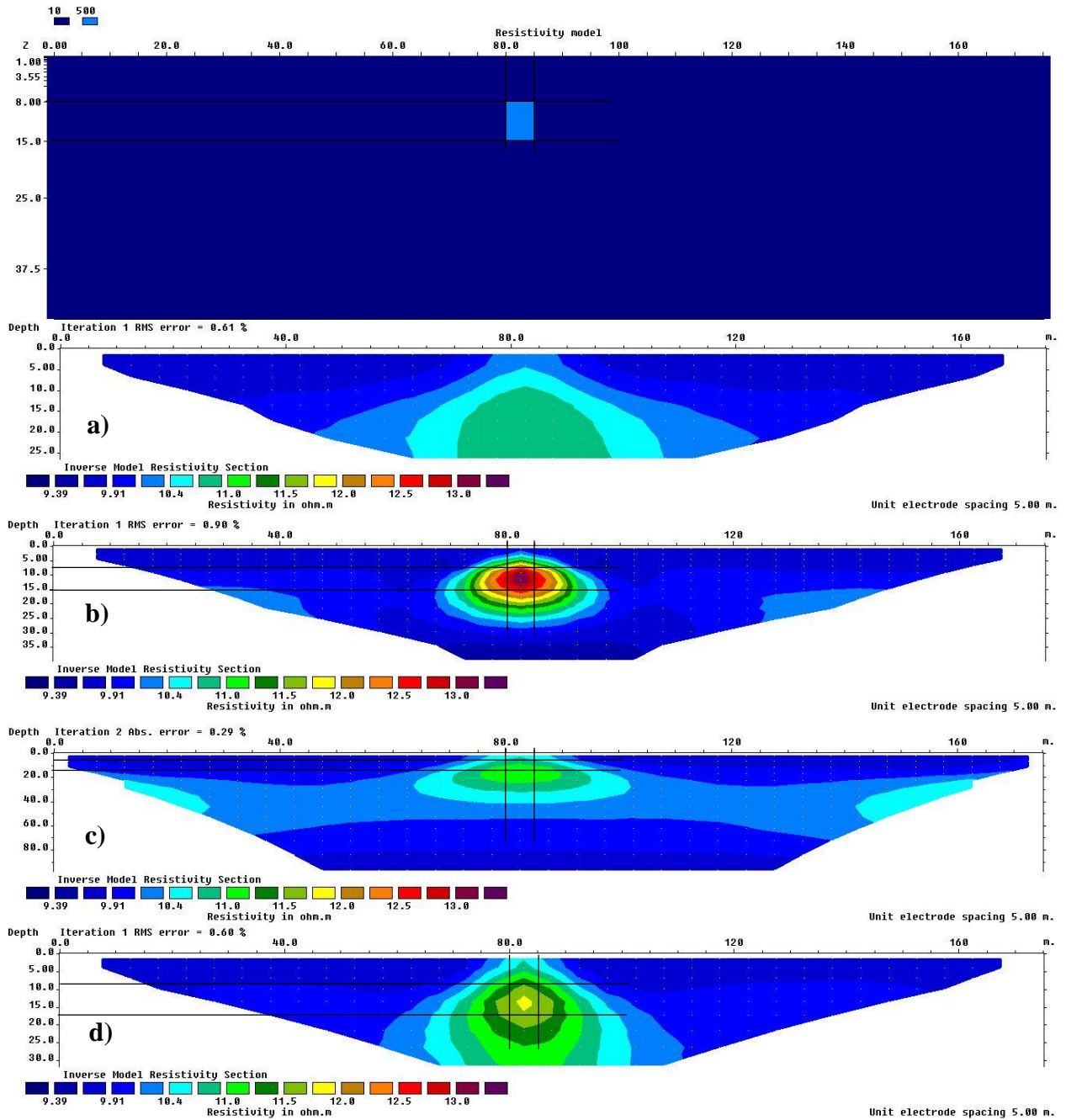


Figure5. 5: En haut modèle géo-électrique synthétiques modélisés avec Res2Dmod représente une cavité de 7 m de haut à une profondeur de 8 m. En bas : comparaison de l'inversion des résultats du modèle direct avec la méthode robuste pour les dispositifs d'acquisition TRE suivant : a) Wenner Alpha, b) Dipôle-dipôle, c)Pôle-pôle, d) Wenner-Schlumberger.

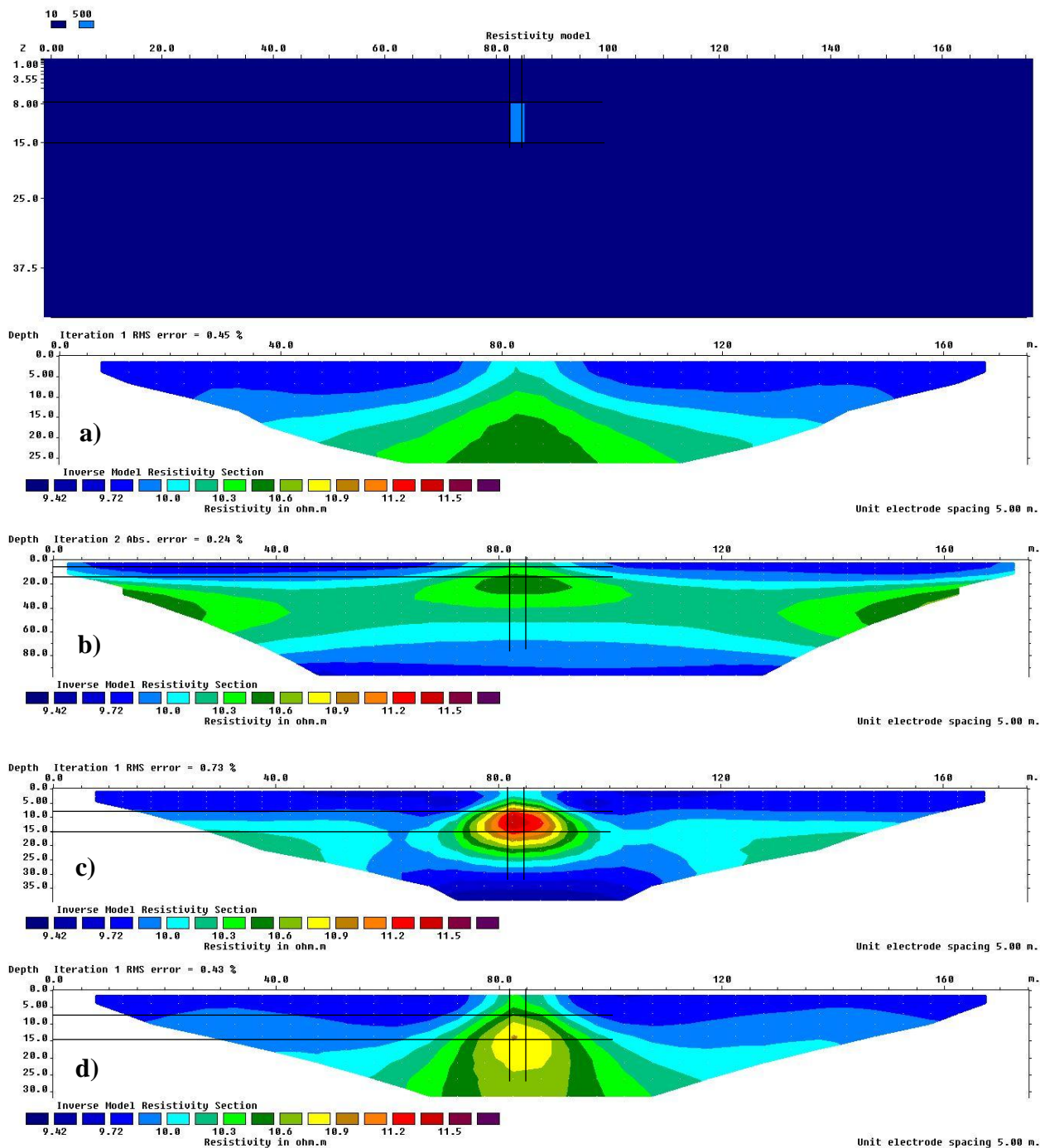


Figure 5. 6: En haut modèle géo-électrique synthétiques modélisés avec Res2Dmod représente une cavité de 7 m de haut à une profondeur de 8 m. En bas : comparaison de l'inversion des résultats du modèle direct avec la méthode robuste pour les dispositifs d'acquisition TRE suivant : a) Wenner Alpha, b) Pôle-pôle, c) Dipôle-dipôle, d) Wenner-Schlumberger.

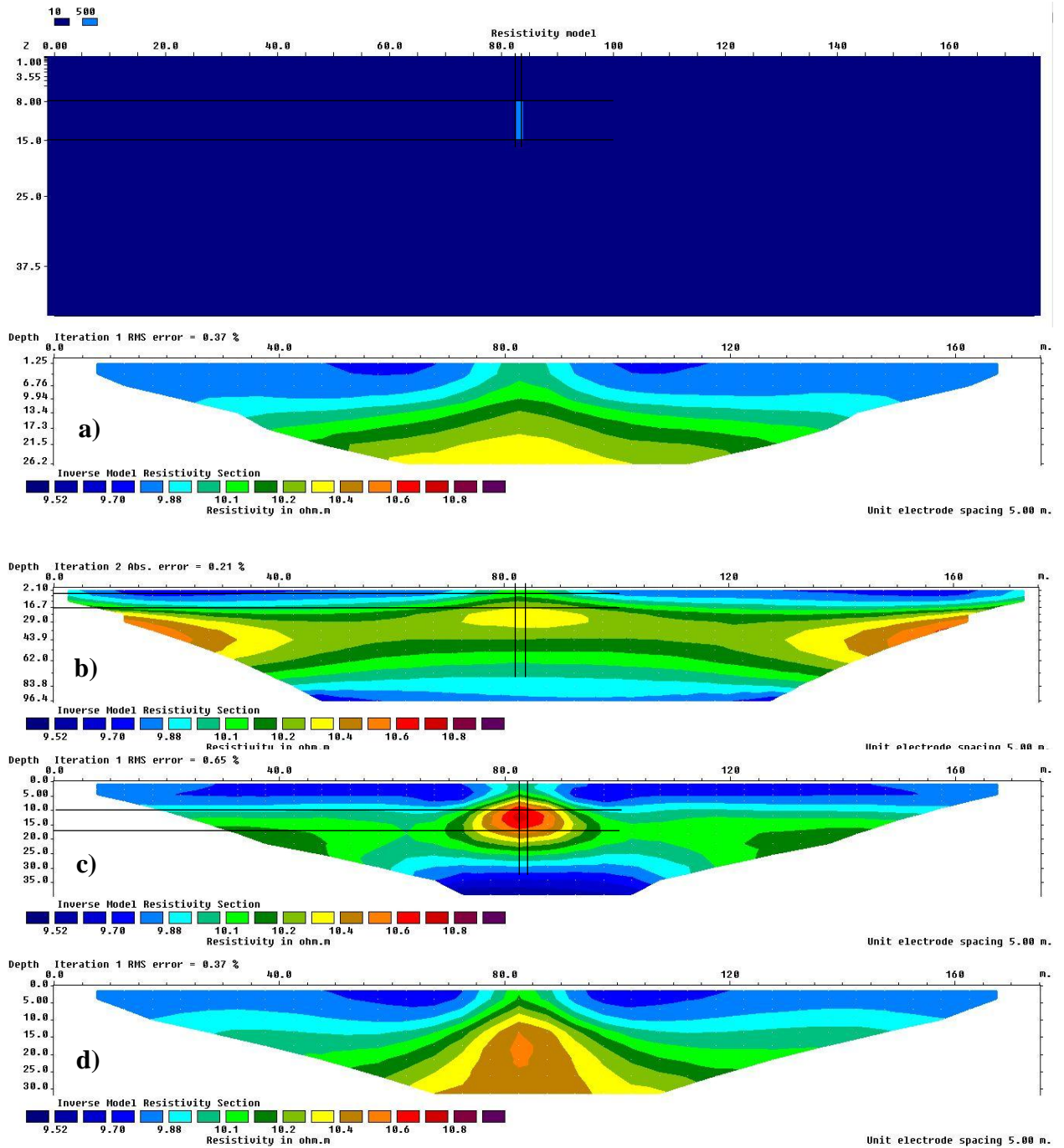


Figure 5. 7: En haut : modèle géo-électrique synthétiques modélisés avec Res2Dmod représente une cavité de 7 m de haut à une profondeur de 8 m. En bas : comparaison de l'inversion des résultats du modèle direct avec la méthode robuste pour les dispositifs d'acquisition TRE suivant : a) Wenner Alpha, b) Pôle-pôle, c) Dipôle-dipôle, d) Wenner-Schlumberger.

Conclusion

A la fin de cette modélisation, nous avons conclu que la méthode d'inversion robuste est la plus adaptée pour la détection des cavités vu qu'elle permet de préserver les discontinuités. Le Dipôle-Dipôle est le meilleur dispositif qui a indiqué la position et la géométrie exacte des différentes cavités étudiées. La distance inter-électrode joue aussi un rôle important dans la détection des cavités et pour une détection optimale, cette distance ne doit pas dépasser la longueur de la cavité. Dans le processus d'inversion, l'échelle des résistivités vraies, calculées à partir des résistivités apparentes, sont influencées par les grandes épaisseurs des couches en profondeur.

Chapitre 06

**Application de Tomographie
électrique**

Introduction

Dans ce chapitre, on a présenté le choix du profil de tomographie électrique, son principe d'acquisition ainsi que l'instrument utilisé. Ensuite, vient la phase d'analyse et d'inversion des données mesurés sur le terrain. Enfin, on a terminé par une discussion de la qualité des modèles obtenus ainsi que leurs interprétations.

6.1. Choix du profil de tomographie électrique sur le terrain

Le choix du profil a été fait après l'observation du terrain et un temps de réflexion pour essayer de recouper au mieux les accidents géologiques. Son orientation a été choisie en supposant que le gouffre se prolonge en profondeur avec une composante latérale qui se prolonge dans le sens de la plaine d'Aswel. Cette supposition est déduite à partir de la structure qui affleure en surface, des pendages des couches de calcaires et des travaux antérieurs (la coupe de Flandrin 1952), donc le profil a été orienté dans le sens où il va couper perpendiculairement la structure supposée.

Le profil de tomographie électrique a été réalisé au niveau de la doline d'Aswel, entouré par des massifs de calcaire rocheux qui est caractérisée par un sol bien développé argileux, à quelque mètre du gouffre d'Aswel (Fig.6.1) qui est un canal de drainage et d'alimentation du karst du Djurdjura. Selon les chercheurs il est à des profondeurs très importantes le long de la faille, il a une largeur d'environ 3 mètre. L'eau dans le gouffre se trouve à quelque mètre (environ de 6 m) ou un caillou d'environ 150 gramme prend 3.5 seconde pour toucher l'eau.

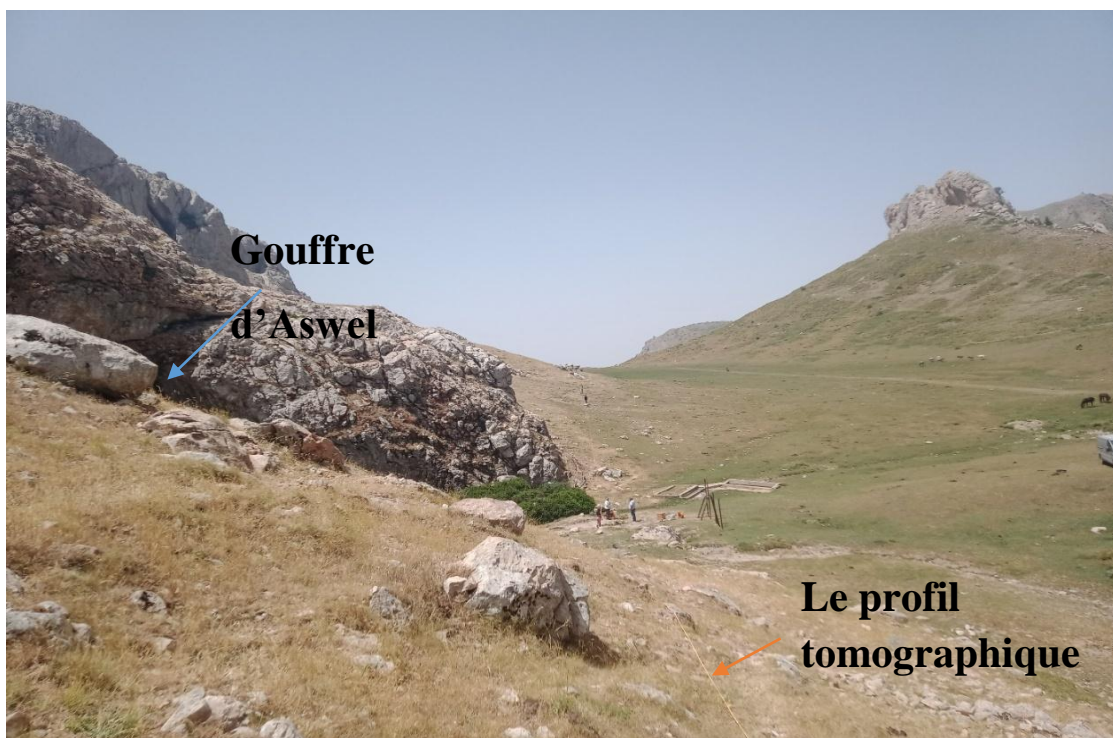


Figure 6. 1: Photo prise d'emplacement du profil tomographique.

6.2. Instrument de mesure

Il est de marque ABEM et il est composé de (Fig.6.2) :

- Un résistivimètre de modèle TERRAMETER LS. C'est un instrument équipé d'un système de multiprocesseurs opérant avec un accumulateur de 600V, lui permettant de générer un courant continu jusqu'à 2,5A. Il contient les protocoles de mesure des différents dispositifs. Son rôle sur le terrain est de mesurer la résistivité apparente du milieu ;
- Une batterie externe de 12 V ;
- 64 électrodes en acier inoxydable ;
- 64 bretelles à pinces ;
- 4 câbles pour relier les électrodes au système d'acquisition, avec leurs bobines (faire attention à bien ranger les câbles pour qu'ils se déroulent facilement sur le terrain et prendre garde à ne pas laisser traîner les embouts) ;
- Deux connecteurs de câbles ;

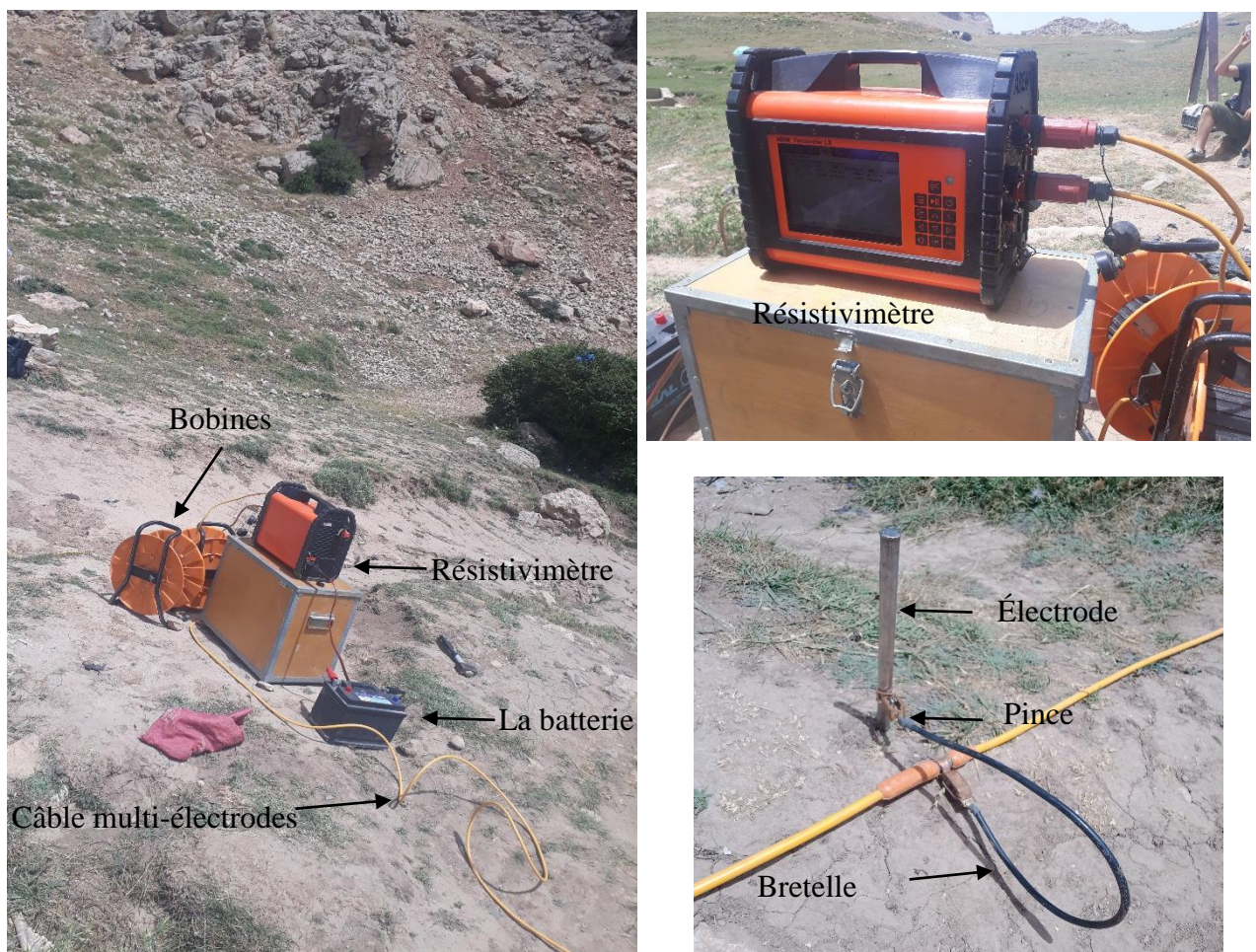


Figure 6. 2: Photo du Matériel d'acquisition multi-électrodes utilisé dans le terrain.

6.3. Acquisition des données électrique sur le terrain

Dans la présente étude, la séquence de mesure pour recueillir les données de résistivité apparente 2D a été réalisée à environ de 10 mètre de l'entrée du gouffre d'Aswel, notre profil contient 64 électrodes en acier inoxydable avec une distances inter-électrode de 5 mètre reliées au câble par une bretelle à pinces ; donc le profil atteint 315 mètres de longueur (Fig.6.3).

Les mesures des données de tomographie électrique ont été acquises par les dispositifs Wenner-Schlumberger qui a donné 24 niveaux d'enregistrements avec une profondeur de 60 m. par contre le dispositif Dipôle-dipôle a donné 18 niveaux d'enregistrements et il a atteint 30 mètre de profondeur.



Figure 6. 3: Image de Google Earth du profil tomographique.

6.4. Analyse des données mesurées

Le logiciel RES2DINV (Loke and Barker, 1995) permet une représentation judicieuse des mesures qui illustre les points par niveau d'acquisition avec une échelle très restreinte. Ce type de représentation fait ressortir les points, dont les résistivités sont très fortes ou très faibles par rapport à leurs voisines. Un changement aussi rapide des valeurs parfois ne pouvant être dû à un phénomène géologique, et donc pour avoir des résultats fiables après l'inversion, l'élimination des données électriques bruitées reste une étape importante. Les données représentant un mauvais rapport signal sur bruit sont systématiquement enlevées, afin qu'elles ne faussent pas les résultats de l'inversion.

La répartition des points de mesures est homogène sur l'ensemble du profil réalisé par le dispositif Wenner-Schlumberger ce qui reflète la bonne qualité des mesures (Fig.6.4). Par contre la répartition des points de mesures sur le profil réalisé par le dispositif Dipôle-Dipôle montre quelques points qui sont éloignés de la tendance moyenne des résistivités apparentes (Fig.6.5). Ces points peuvent représenter des artefacts de mesures correspondant à un faible rapport signal/bruit. Leurs éliminations sont nécessaires avant de commencer le processus d'inversion.

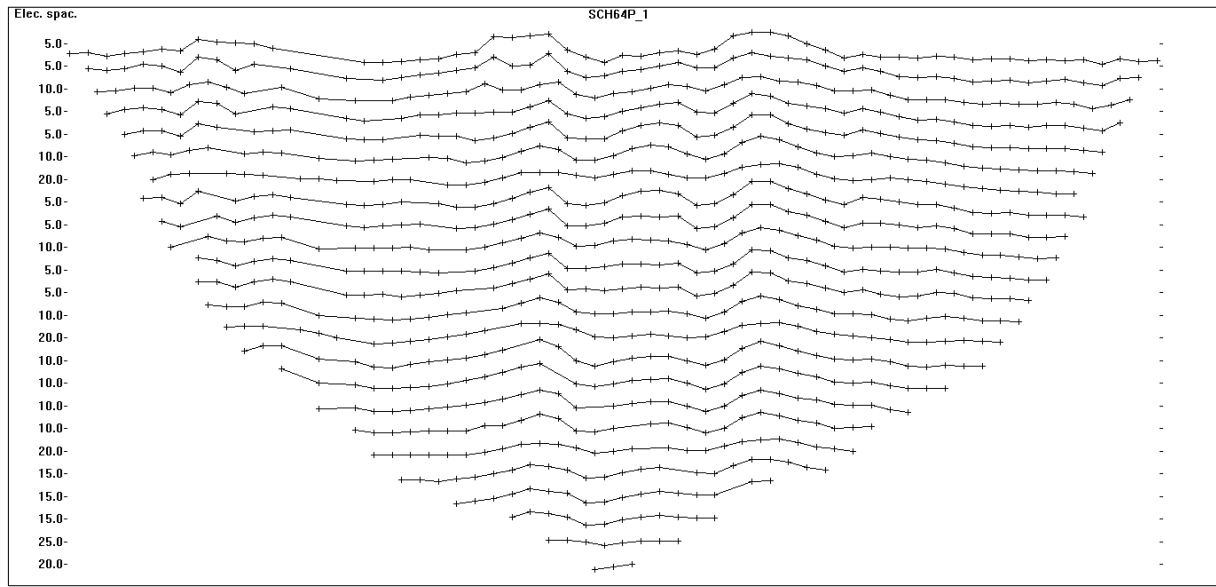


Figure 6. 4: Représentation des points de mesure du profil réalisés par le dispositif Wenner-Schlumberger sur le logiciel RES2DINV.

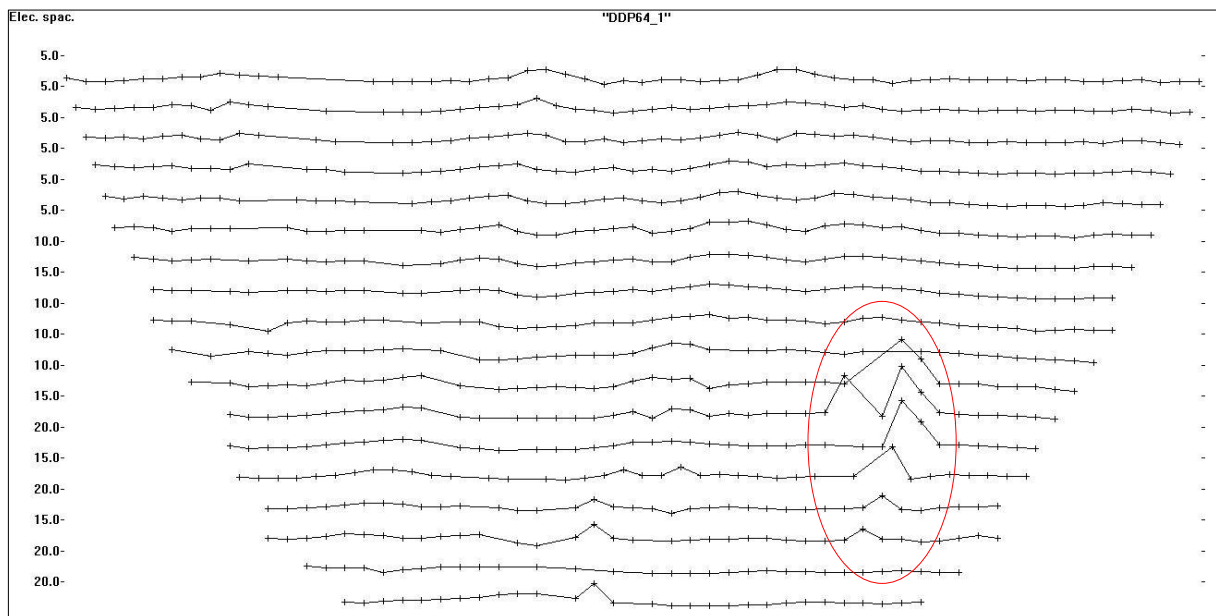


Figure 6. 5: Représentation des points de mesure réalisés par le dispositif Dipôle-Dipôle sur le logiciel RES2DINV.

6.5. Inversion 2D

Une fois les données de résistivité apparentes collectées, l'opération inverse du problème direct est résolue pour remonter aux caractéristiques inconnues du terrain. Autrement dit, il s'agit, à partir des données mesurées sur le terrain (résistivités apparentes mesurées), de retrouver les paramètres du modèle de terrain (résistivités inversées, proches des résistivités vraies), décrivant le sous-sol de manière plausible et expliquant bien les données de résistivités apparentes mesurées.

Le traitement des données est effectué à partir de logiciels d'inversion pour déterminer les résistivités électriques vraies à partir de la pseudo-section obtenue sur le terrain. Nous avons utilisé le programme d'inversion RES2DINV basé sur une méthode d'optimisation par moindres carrés généralisés. La pseudo-section obtenue avec les données de terrain est divisée en un certain nombre de blocs rectangulaires dont la taille augmente avec la profondeur. Cette augmentation est généralement de 10 à 25 % selon le type d'acquisition (Wenner-Schlumberger, Dipôle-dipôle).

Dans le processus d'inversion, on a utilisé l'option « **USE MODEL RAFFINEMENT** » car un changement rapide des résistivités a été observé, latéralement, dans le profil. Cette fonction sert à affiner le modèle, en utilisant des cellules ayant la moitié de la distance inter-électrode d'acquisition (**2.5 m** au lieu de **5 m**), à améliorer leurs résolutions et à bien marquer les discontinuités après l'inversion. Concrètement, entre chaque deux électrode espacée de 5 m, une résistivité moyenne est calculée et affectée au centre. Ceci explique la distance inter-électrode de **2.5 m** qui figure dans les modèles de résistivité (Fig.6.8a et b). L'option robuste est utilisée aussi dans le processus d'inversion. Elle est idéale pour des zones marquées par des changements rapides de résistivité et elle permet de préserver les discontinuités.

6.6. Qualité des modèles de résistivité

On peut quantifier la qualité des modèles inversés avec des indices d'évaluation de la fiabilité des modèles obtenus à la fin du processus de l'inversion. On aborde ici l'erreur quadratique moyenne RMS (Root-Mean-Square).

Ce paramètre est une bonne indication de la qualité d'un profil, cependant ce n'est pas l'itération qui présente une valeur RMS la plus faible qui donne le modèle le plus juste (Naudet, 2004). Quatre à six itérations suffisent habituellement pour converger vers le modèle de résistivité électrique vrai qui rend le mieux compte des observations de terrain. Elle est exprimée en pourcentage.

A chaque modèle d'inversion est associée une erreur RMS. Elle est très élevée aux premières itérations, surtout dans le cas de dispositif Dipôle-dipôle avec (RMS = 18,22 %) et (RMS= 9.57 %) pour le dispositif Wenner-Schlumberger, elle va ensuite diminuer de façon exponentielle au cours du processus d'inversion (RMS = 3,22) pour Dipôle-dipôle et de (RMS=1,24) pour Wenner-Schlumberger. L'analyse de l'évolution de l'erreur RMS, calculée avec le logiciel RES2DINV, montre que ses valeurs se stabilisent aux environs de l'itération 5 (Fig.6.6).

On constate aussi que les faibles valeurs de l'erreur RMS sont enregistré pour le dispositif Wenner-Schlumberger ce qui signifie que ce dernier reproduit mieux les résistivités apparentes mesurées.

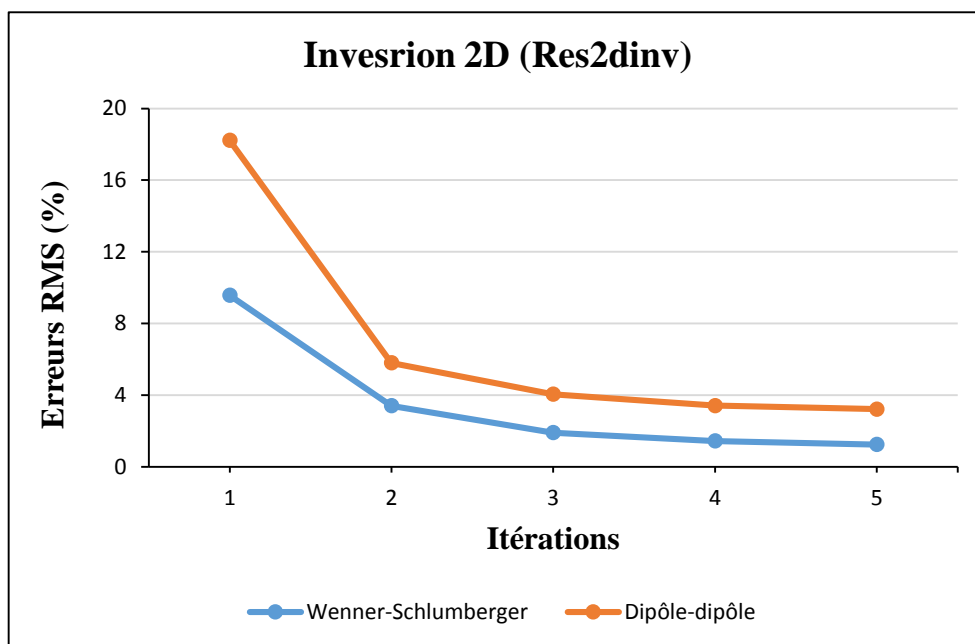


Figure 6. 6: Analyse de l'évolution de l'erreur RMS aux cours des inversions.

Le logiciel Res2dinv nous permis aussi de représenter l'histogramme du pourcentage total des points de mesure en fonction du pourcentage d'erreur du processus d'inversion calculé pour chaque point de mesure (Fig.6.7a) et la corrélation entre les valeurs de résistivité calculées et celles mesurées (Fig.6.7b).

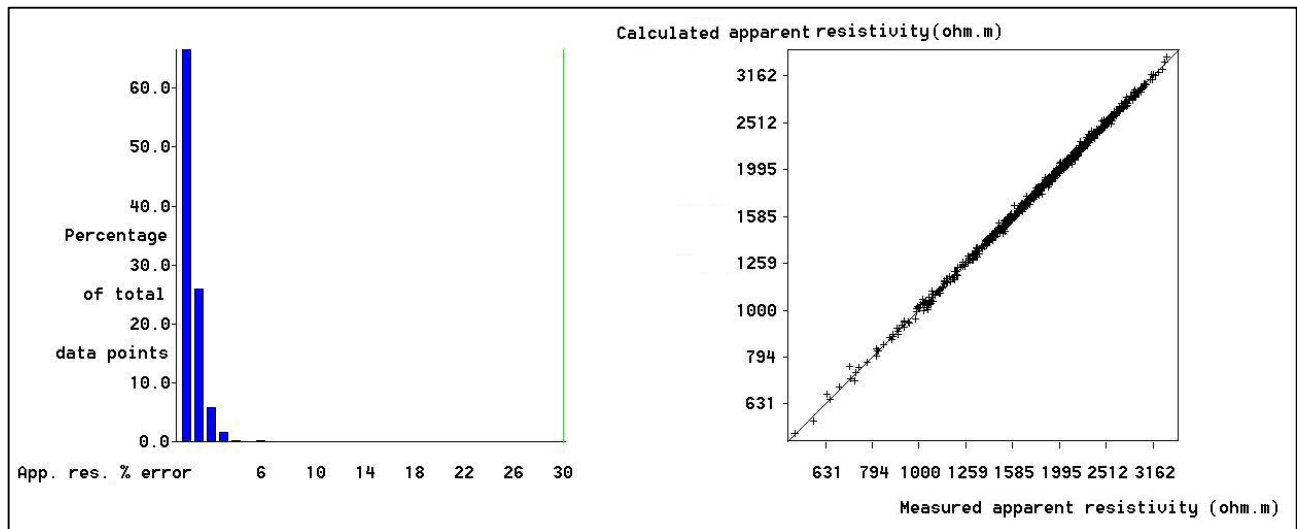


Figure 6. 7: (a) : Histogramme du pourcentage total des points de mesure en fonction du pourcentage d'erreur du processus d'inversion calculé pour chaque point de mesure. (b) : Corrélation entre les valeurs de résistivité calculées et celles mesurées.

6.7. Interprétation des modèles obtenu

Les résultats de l'inversion des deux profils de mesure sont représentés dans les figures 6.8a et b. Une même échelle de résistivité a été imposée pour les deux modèles afin de faciliter l'interprétation. Ces valeurs de résistivité varient dans un large intervalle avec un minimum de $14.48 \Omega.m$ et un maximum de $1612.50 \Omega.m$. Les fortes résistivités ont été attribuées aux calcaires. Les faibles valeurs de résistivité aux marnes et terre végétale alors que les valeurs intermédiaires traduisent des calcaires plus ou moins fracturés et altérés. Les modèles obtenus sont caractérisés par une alternance de zone résistante et de zone conductrice.

L'interprétation consiste à identifier des anomalies géo-électriques par rapport à la résistivité de l'encaissant et leurs donner ensuite un sens géologique probable. De forts contrastes de résistivités ont été observés dans les deux modèles et la même structure globale a été observée. Ces contrastes sont interprétés en termes de modèle géologique. Les variations latérales de résistivité sont plus prononcées à partir des cinq à dix (5 à 10) premiers mètres ; elles indiquent de fortes hétérogénéités lithologiques liées à la présence de contacts géologiques. Une anomalie géo-électrique particulière de fortes résistivités est apparue sous forme d'un anticlinal.

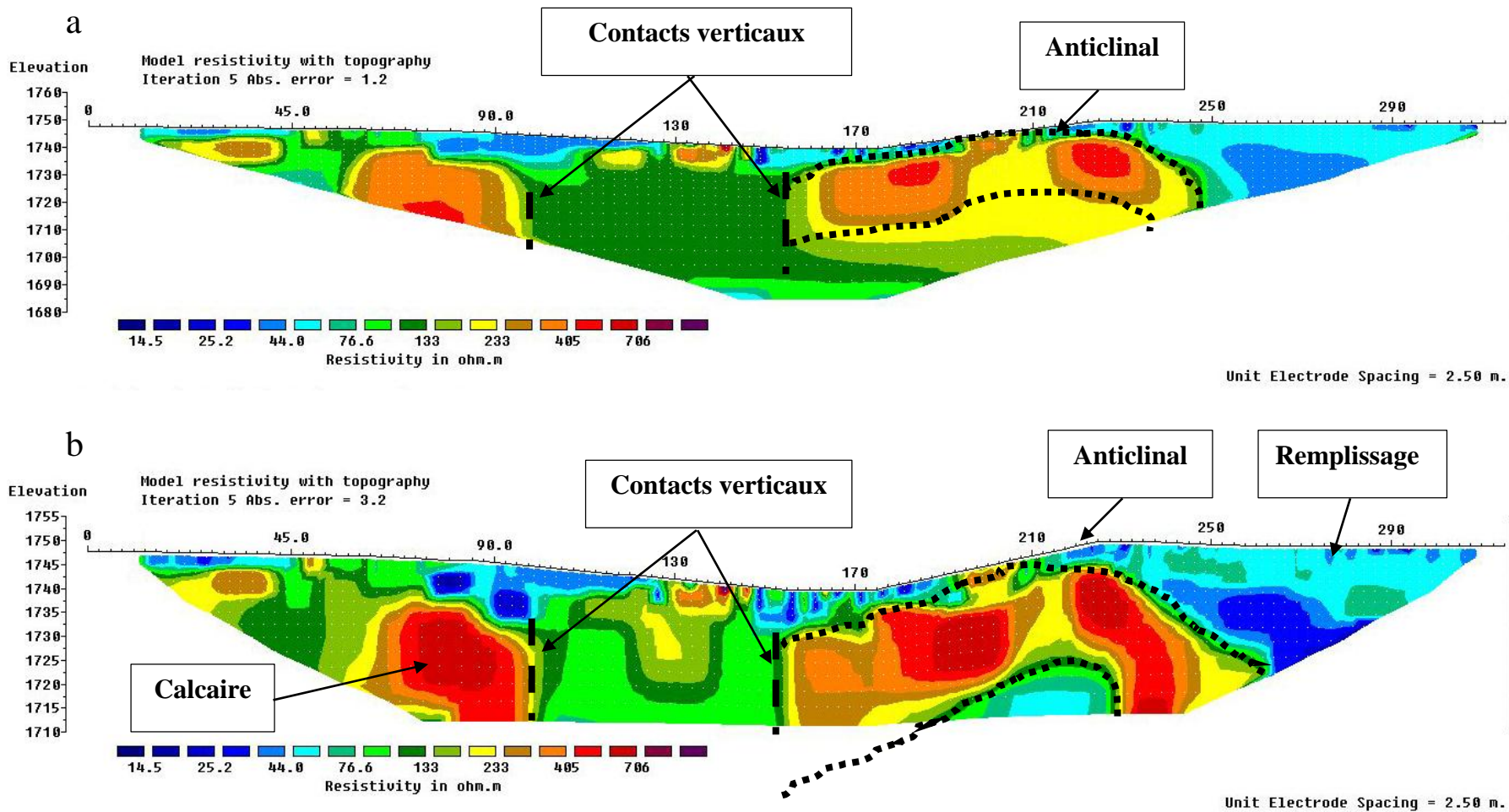


Figure 6. 8: Résultat de l'inversion : (a) Wenner-Schlumberger, (b) Dipôle-Dipôle.

6.8. Conductivité électrique

A partir des profils de tomographie de résistivité électrique réalisée, on peut avoir aussi la distribution de la conductivité électrique du sous-sol de chaque profil. Les valeurs de conductivité varient de 1.3 à 70 Siemen/m*0,001 et de 0,7 à 60 Siemen/m*0,001 pour le dispositif Wenner-Schlumberger et Dipôle-Dipôle respectivement (Fig.6.9a et b).

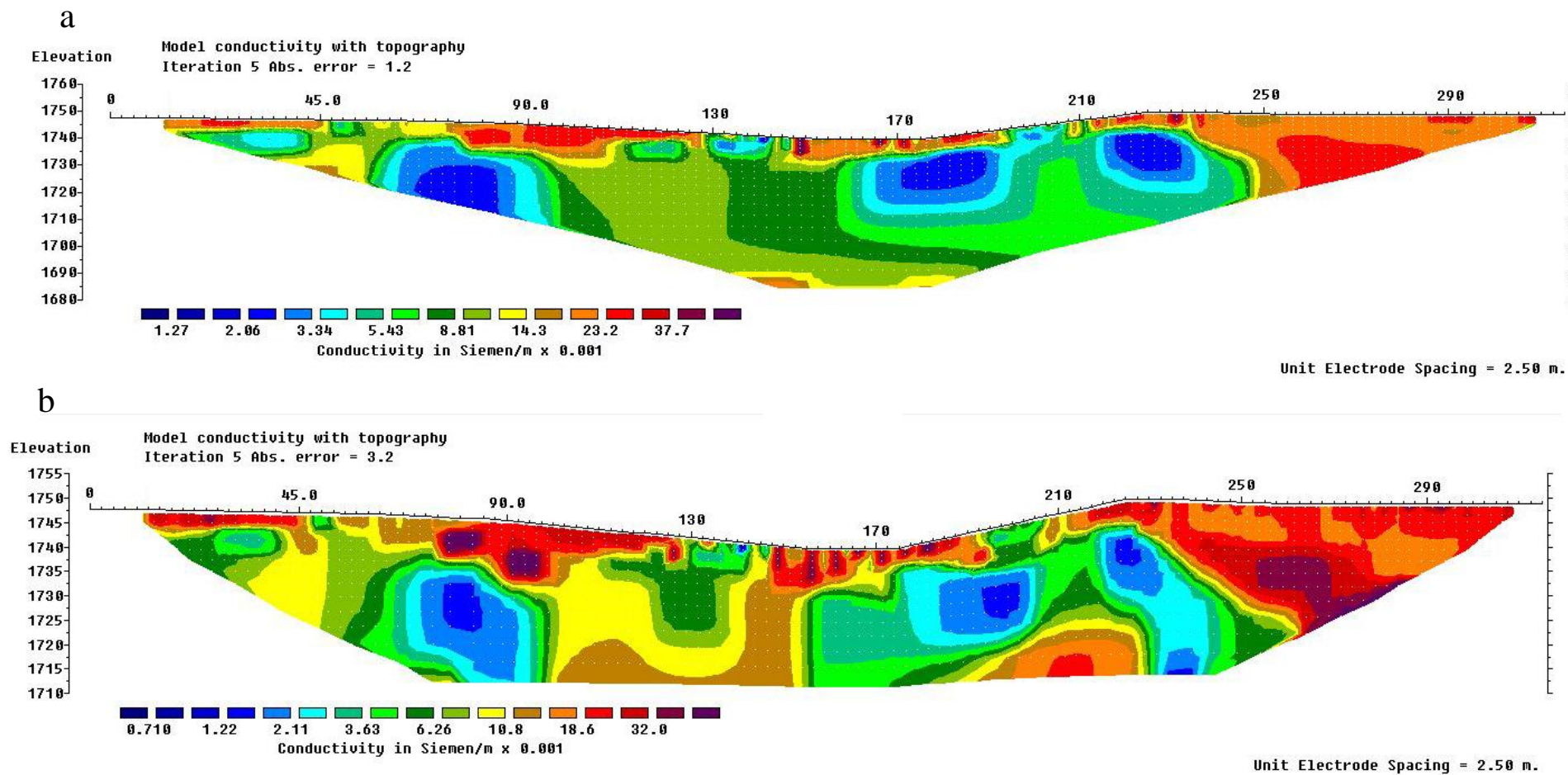


Figure 6. 9: Résultat de l'inversion : (a) Wenner-Schlumberger, (b) Dipôle-Dipôle.

6.9. Utilisation de la TRE dans la protection des ressources en eau

6.9.1. Aperçu sur l'état d'Aswel

Le gouffre d'Aswel se trouve dans un endroit touristique en premier lieu (Fig.6.10) et lieu d'élevage (Fig.6.11) de plusieurs personnes ce qui explique la présence des déchets. Cette pollution, générée par les activités anthropiques risque d'augmenter la contamination de la nappe et peut atteindre des niveaux critiques, présenter un danger grave pour la santé publique.

On sait tous que le fonctionnement d'un système karstique permet une propagation très rapide de l'eau dans les axes de drainage et qui finalisent par la sortie dans les émergences. Autrement dit les écoulements sont très complexes et sa contamination est très rapide ce qui explique la forte vulnérabilité des aquifères karstiques. Donc en conclusion un périmètre de protection est nécessaire pour atténuer la pollution de l'eau et assurer la protection de la nappe et limiter sa détérioration.



Figure 6. 10: Photo prise au niveau d'Aswel sur les activités touristique.



Figure 6. 11: Photo d'élevage dans la doline d'Aswel

6.9.2. Apport de la TRE à la protection des ressources en eau

La TRE peut aider les hydrogéologues à la reconnaissance et à la protection de ressources en eau dans les milieux karstiques qui sont caractérisés par une très forte hétérogénéité et anisotropie en mettant en évidence :

- Localisation des zones de fracturation qui correspondent à des zones de contact. Les axes de fracturation peuvent correspondre à la direction préférentielle du développement de la karstification ;
- Localisation de points d'infiltration préférentielle (gouffres, pertes,) susceptibles d'être colmatés ou cachés sous des sédiments ;
- Mise en évidence des couches argileuses qui jouent un rôle protecteur pour l'aquifère karstique sous-jacent.

Conclusion

La tomographie électrique permettant d'obtenir la répartition de la résistivité des roches à partir de mesures de résistivité apparente sur le terrain. Les résultats de l'interprétation des données obtenue par l'inversion 2D dans la région du Djurdjura dans le but de la recherche des cavités souterraines et la continuité du gouffre au profondeur, ont permis de mettre en évidence en surface des terrains de résistivité inférieure à $100 \Omega\text{m}$ sur 5 à 25 m d'épaisseur entre les abscisses 210 à 315m le long du profil. Ceux-ci correspondent à la couverture sablo-argileuse ou limoneuse de la plaine. Les tomographies ont également indiqué les fortes hétérogénéités lithologiques qui permettent de déterminer la structure existante sous la plaine liée à la présence de contacts géologiques tel que la présence d'un contact verticale et une structure d'un anticlinal proche de la surface. Les résistivités plus élevées montrèrent l'existence en profondeur de calcaires massifs, caractérisés par des résistivités supérieures à $405 \Omega\text{m}$ et qui ne dépassent pas $1612.5 \Omega\text{m}$. Ces mêmes résistivités, ne sont pas assez fortes, pour les affectées aux cavités. De ce qui précède, on déduit que le gouffre d'Aswel se prolonge, probablement, dans d'autres directions, sous le massif calcaire.

Il faut signaler que la profondeur d'investigation atteinte par la tomographie électrique reste approximative car elle est très dépendante de divers paramètres tels que l'appareil et le dispositif de mesures, la résistivité électrique des formations, la présence de l'eau, la morphologie du terrain investigué etc. L'application des méthodes géophysiques est aujourd'hui un défi dans un environnement karstique à cause de la présence d'hétérogénéités mais présente un grand avantage en raison de leur caractère non destructif.

Conclusion générale

Le Djurdjura est un massif montagneux du nord de l'Algérie. C'est un élément majeur d'un ensemble géologique de la chaîne des Maghrébides fortement soulevée avec des versants à la verticale sur une longueur de près de 110 km et est située au Sud du BV02 (côtier algérois). La chaîne est caractérisée par une lithologie qui constitue principalement des calcaires et des formations silicéo-clastiques, qui favorise le phénomène de karstification. Il se développe en profondeur en formant des galeries souterraines. C'est le karst le plus important en Afrique avec sa morphologie et ses structures particulières. La région est soumise à un climat méditerranéen humide de montagne. Les précipitations peuvent varier considérablement d'une année à une autre. Il est considéré comme l'endroit le plus arrosé en Algérie. Le faciès chimique de l'eau est essentiellement de type bicarbonaté-calcique avec une tendance de sulfate.

Afin de choisir les dispositifs et la méthode à utiliser sur le terrain, nous avons modélisé des cavités résistantes sur une forme rectangulaire située à différentes profondeurs avec des différents dispositifs d'acquisition à l'aide du logiciel de modélisation électrique (Res2Dmod) et d'inversion (Res2inv) nous avons conclu que les meilleurs dispositifs sont Dipôle-Dipôle et Wenner-Schlumberger, et la méthode Robust est la plus adaptée à déterminer les cavités. La distance inter-électrode ne doit pas dépasser la longueur de la cavité.

A partir des 2 profils de tomographie de résistivité électrique réalisés à 10 m de l'entrée du gouffre d'Aswel avec un dispositif Wenner-Schlumberger et Dipôle-Dipôle, nous avons déterminé la morphologie karstique sous couverture (la forme des calcaires, présence des contacts verticaux). La prospection électrique en général et la tomographie de résistivité électrique particulièrement peut apporter des éléments importants aux hydrogéologues afin de bien connaître ces systèmes pour pouvoir protéger et exploiter leurs ressources en eau. Parmi les avantages de la tomographie électrique on a la haute résolution horizontale et verticale, le grand rendement en termes de superficie explorée avec un bon rapport sur la portabilité du matériel et le coût de déploiement.

La complexité structurale du karst du Djurdjura, l'absence d'études géologiques et tectoniques détaillées, l'absence de forages et le manque de description géologique précise, sont des éléments qui rendent l'étude hydrogéologique encore plus compliquée et par conséquent le rôle de la géophysique plus restreint. En effet, la géophysique a besoin d'informations primaires, afin d'avancer avec précision sur l'interprétation des données acquises sur le terrain. Sans elles, les résultats obtenus risquent de ne pas correspondre à la réalité géologique.

Conclusion générale

L'eau lessive tous ce qu'il trouve dans son chemin, les karsts caractérisés par des annexes et des drains permettent la circulation rapide de l'eau donc la diffusion de toute sorte de polluant transporté par l'eau. Et comme Aswel est une zone touristique et d'élevage donc elle est exposée à tous risques de pollution et qui s'émergent dans les sources. Il est nécessaire de trouver une solution afin de protéger la santé des villageois de la région et toutes les espèces de la faune et de la flore, en réalisant des périmètres de protection dans toutes les zones d'alimentation et l'application des lois juridiques.

Perspective

Afin de mieux connaître le système karstique du Djurdjura, et de continuer de travailler dessus, on proposera quelques perspectives suivantes :

- La combinaison d'autre méthode géophysique à côté de la TRE est indispensable pour la caractérisation au mieux de ce site dans sa globalité. Parmi les méthodes géophysiques qu'on peut proposer pour l'étude des aquifères karstiques : la tomographie sismique, la sismique haute résolution, la micro-gravimétrie, résonance magnétique protonique (RMP), sondage électromagnétique en domaine fréquentiel (FDEM) et sondage électromagnétique en domaine temporel (TDEM).
- La réalisation des sondages électriques azimutal ou tomographie de résistivité électrique azimutal nous permettra d'identifier les différentes directions préférentielles qu'on peut affecter aux directions des fissures ou aux directions des écoulements des eaux souterraines.
- La réalisation des profils de tomographie de résistivité électriques répétés dans le temps permet d'étudier et de comprendre l'évolution du système karstique au cours du temps.

Références Bibliographiques

- Abbassene, F. (2016). *Contraintes chronologiques et pétro-géochimiques du magmatisme sur l'évolution pré-et post-collisionnelle de la marge algérienne: secteur de la Petite Kabylie*. Université de Bretagne occidentale-Brest.
- 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 hydrochimique: 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.
- Aissaoui, R. (2020). *Contribution de l'anisotropie électrique à l'étude des hétérogénéités dans la Mitidja Est*.
- Amari, A., & Aneur, T. (2021). *Etude hydrogéologique d'un barrage : cas de Souk N'Tleta*. Université Mouloud Mammeri de Tizi-Ouzou.
- Amiri, N., & Bekdouche, F. (2015). Analyse de la flore du Parc National du Djurdjura. ANRH. Agence Nationale des Ressources Hydrauliques.
- Archie, G. E. (1942). The electrical resistivity log as an aid in determining some reservoir characteristics. *Transactions of the AIME*, 146(01), 54-62.
- Audebert, M. (2015). *Développement d'une méthode de contrainte des modèles hydrodynamiques par une stratégie d'analyse des données géophysiques ERT: Application aux écoulements de lixiviat dans les massifs de déchets*. Université Grenoble Alpes (ComUE).
- Bakalowicz, M. (1979). *Contribution de la géochimie des eaux à la connaissance de l'aquifère karstique de la karutification*. Université Pierre et Marie Curie, Paris.
- Bakalowicz, M. (1995). La zone d'infiltration des aquifères karstiques. Méthodes d'étude. Structure et fonctionnement.
- Baudelot, S., & Gery, B. (1979). Discovery of acritarchs in the upper cambrian and tremadocian forlations of the paleozoic massif of the grande kabylie (Algérie). *comptes rendus hebdomadaires des seances de l'academie des sciences serie D*, 288(20), 1513-1516.
- Bedrosian, P. A., & al. (2012). Geophysical investigations of geology and structure at the Martis Creek Dam, Truckee, California. *Journal of Applied Geophysics*, 77, 7-20.
- Belkaid, H. (2016). *Analyse spatiale et environnementale du risque d'incendie de forêt en Algérie: Cas de la Kabylie maritime*. Nice.
- Bendif, D., & Beldjilali, H. (2018). *Contribution à l'étude géologique et gîtologique des albitophyres associés au socle kabyle de la série de Djebel Aissa Mimoun (la région de Tizi-Ouzou)*. Université Mouloud Mammeri Tizi-Ouzou.
- Benhassaine, M. (1980). Recherche sur les modèles de relief et les formations superficielles dans la vallée de l'oued Sébaou. *These 3eme cycle, Université Paris VI, France*, 282.

Références Bibliographiques

- Besson, A., & al. (2004). Structural heterogeneity of the soil tilled layer as characterized by 2D electrical resistivity surveying. *Soil and Tillage Research*, 79(2), 239-249.
- Birebent, J. G. (1953). Explorations souterraines en Algérie. *Ann Spéléologie*, 9-62.
- Blondel, A. (2014). *Développement des méthodes géophysiques électriques pour la caractérisation des sites et sols pollués aux hydrocarbures*. Université Michel de Montaigne-Bordeaux III.
- 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'un olistostrome 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 relique des Ait Ouabane*. Thèse Ing. Agr., Univ. Tizi Ouzou.
- Busby, J. (2000). The effectiveness of azimuthal apparent-resistivity measurements as a method for determining fracture strike orientations. *Geophysical prospecting*, 48(4), 677-695.
- Chalikakis, M. (2006). Application de Méthods Géophysiques pour la Reconnaissance et la Protection de Ressources en Eau dans les Milieux Karstiques [thèse de doctorat]: Paris. France, l'Université Paris, 6, 223.
- 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 Bousouil, témoin privilégié de l'évolution géologique récente du Djurdjura. *Revue belge de géographie*, 48-51.
- Daif, M. (2017). *Etude des quelques variables climatiques du sous bassin de Sebaou (W.Tizi-Ouzou)*. Mémoire de master.
- Debeglia, N., & al. (2006). Karst investigations using microgravity and MASW; Application to Orléans, France. *Near Surface Geophysics*, 4(4), 215-225.
- Derridj, A. (1990). *Étude des populations de Cedrus atlantica Manetti en Algérie*. Thèse de doctorat, Université Paul Sabatier, Toulouse, France, 288 p. [http](http://...)
- Descloitres, M., & al. (2008). Characterization of seasonal local recharge using electrical resistivity tomography and magnetic resonance sounding. *Hydrological Processes: An International Journal*, 22(3), 384-394.
- Djemai, M. (1985). *Hydrologie du bassin versant du haut Sébaou: hydrogéologie des formations alluviales (Algérie)*. Université Scientifique et Médicale de Grenoble.
- Dubuis, A., & Faurel, L. (1994). Essai sur la flore montagnarde du Djurdjura. Endémisme et affinités floristiques. *Mémoire Soc. Hist. Nat. Afr. du Nord. Numéro Hors-série* (2), 65-78.
- 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.
- Fargier, Y. (2011). *Développement de l'Imagerie de Résistivité Électrique pour la reconnaissance et la surveillance des Ouvrages Hydrauliques en Terre*. Ecole Centrale de Nantes (ECN).
- Fauchard, C., & al. (2004). Détection de cavités souterraines par méthodes géophysiques. *Guide technique- Laboratoire central des ponts et chaussées*.
- Ficheur, L. E. (1890). *Description géologique de la Kabylie du Djurdjura: étude spéciale des terrains tertiaires*: imprimerie de Fontana.

Références Bibliographiques

- Ford, D. C., & Williams, P. W. (1989). *Karst geomorphology and hydrology* (Vol. 601): Springer.
- Fournier, M., Massei, N., Bakalowicz, M., Dussart-Baptista, L., Rodet, J., & Dupont, J.-P. (2007). Using turbidity dynamics and geochemical variability as a tool for understanding the behavior and vulnerability of a karst aquifer. *Hydrogeology Journal*, 15(4), 689-704.
- Geyer, T., & al. (2008). Quantification of temporal distribution of recharge in karst systems from spring hydrographs. *Journal of Hydrology*, 348(3-4), 452-463.
- Gupta, S., & Hanks, R. (1972). Influence of water content on electrical conductivity of the soil. *Soil Science Society of America Journal*, 36(6), 855-857.
- Hebbache, K. (2017). *Contribution à la reconnaissance du sol par tomographie électrique*. Université Mohamed Khider-Biskra.
- Hibert, C. e. a. (2012). Characterizing landslides through geophysical data fusion: Example of the La Valette landslide (France). *Engineering Geology*, 128, 23-29.
- Jeannin, P. (1996). *Structure et comportement hydraulique des aquifères karstiques*, University of Neuchâtel. Thèse, CHYN.
- 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.
- Kaufmann, O., & Quinif, Y. (2001). *An application of cone penetration tests and combined array 2D electrical resistivity tomography to delineate cover-collapse sinkhole prone areas*. Paper presented at the Geotechnical and environmental applications of karst geology and hydrology.
- Kebbab, L. (2012). *Ecologie alimentaire et utilisation du milieu par la Mangouste Herpestes ichneumon dans le Parc National du Djurdjura (forêt de DARNA)*. Université Mouloud Mammeri.
- Krouchi, F. (1995). Contribution à l'étude de l'organisation reproductive de Cèdre de l'Atlas (*Cedrus atlantica* Manetti) à Tala Guilef, Djurdjura Nord occidental. *Thèse. Magistère, INA El Harrache, Algérie*.
- Labat, D., & Mangin, A. (2015). Transfer function approach for artificial tracer test interpretation in karstic systems. *Journal of Hydrology*, 529, 866-871.
- IBakalowicz, M. (1999). *Connaissance et gestion des ressources en eaux souterraines dans les régions karstiques: SDAGE Rhône Méditerranée Corse*.
- IBakalowicz, M., & al. (2005). Karst vulnerability mapping: improvement of the RISKE method. *Proceedings of KARST*, 123-140.
- Legault, S. (2008). Un comité de suivi d'une exploitation minière à proximité d'une communauté en transformation. *L'industrie minière et le développement durable*-, 55.
- Loke. (2007). Rapid 2-D resistivity & IP inversion using the least-squares method. geoelectrical imaging 2D & 3D. GEOTOMO SOFTWARE, Malaysia.
- Loke, & .al. (1996). Rapid least-squares inversion of apparent resistivity pseudosections by a quasi-Newton method1. *Geophysical prospecting*, 44(1), 131-152.
- Loke, & .al. (2003). A comparison of smooth and blocky inversion methods in 2D electrical imaging surveys. *Exploration geophysics*, 34(3), 182-187.
- Lorette, G. (2019). *Fonctionnement et vulnérabilité d'un système karstique multicouche à partir d'une approche multi-traceurs et d'un suivi haute-résolution: application aux Sources du Toulon à Périgueux (Dordogne, France)*. Bordeaux.

Références Bibliographiques

- Louda, I. (2016). *Etude de la vulnérabilité des eaux souterraines de la plaine alluviale du haut Sébaou par la méthode de PRASTCHIM. Mémoire du master.*
- Loukkas, A. (2006). *Atlas des parcs nationaux algériens: Parc national de Théniet El Had.*
- Mahler, B. J., & Lynch, F. L. (1999). Muddy waters: temporal variation in sediment discharging from a karst spring. *Journal of Hydrology*, 214(1-4), 165-178.
- Mangin, A. (1975). *Contribution à l'étude hydrodynamique des aquifères karstiques.* Université de Dijon.
- Marescot, L. (2004). *Modélisation directe et inverse en prospection électrique sur les structures 3D complexes par la méthode des éléments finis.* Universités de Nantes et de Lausanne.
- Marescot, L. (2008). *Imagerie électriques pour géologues: acquisition, traitement, interprétation. Cours.*
- Marsaud, B. (1996). *Structure et fonctionnement de la zone noyée des karsts à partir des résultats expérimentaux.* Paris 11.
- McGrath, R., & al. (2002). Integrated high-resolution geophysical investigations as potential tools for water resource investigations in karst terrain. *Environmental geology*, 42(5), 552-557.
- Meddour, R. (2012). *Bioclimatologie, phytogéographie et phytosociologie en Algérie: Exemple des groupements forestiers et preforestiers de kabylie djurdjurenne.* Université Mouloud Mammeri.
- Metwaly, M., & AlFouzan, F. (2013). Application of 2-D geoelectrical resistivity tomography for subsurface cavity detection in the eastern part of Saudi Arabia. *Geoscience Frontiers*, 4(4), 469-476.
- Militzer, H., & al. (1979). Etude théorique et expérimentale de la recherche de cavité par des méthodes de résistivité géoélectriques. *GEOPHYS PROSP*, 27(3).
- Monbaron, M. (1993). *La géomorphologie, élément indispensable dans toute étude d'impact sur l'environnement.*
- Monbaron, M. (2010). cours pédagogique de Géomorphologie générale.
- 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.*
- Naudet, V. (2004). *Les méthodes de résistivité électrique et de potentiel spontané appliquées aux sites contaminés.* Université de droit, d'économie et des sciences-Aix-Marseille III.
- Noel, M., & XU, B. (1992). Cave detection using electrical resistivity tomography. *Cave science (1982)*, 19(3), 91-94.
- P.N.D. (2011). Données du Parc National du Djurdjura.
- Pagney, P. (1973). S. Daveau et O. Ribeiro. La zone intertropicale humide (collection «U»). *Revue Géographique de l'Est*, 13(4), 559-560.
- Palmer, A. N. (1989). Geomorphic history of the Mammoth Cave system *Karst hydrology* (pp. 317-337): Springer.
- Plagnes, V. (1997). *Structure et fonctionnement des aquifères karstiques: caractérisation par la géochimie des eaux.* Montpellier 2.
- Portal, A. (2015). *Etude géophysique de la structure interne d'un dôme volcanique: le Puy de Dôme et son environnement (Chaîne des Puys, France).* Université Blaise Pascal-Clermont-Ferrand II.

Références Bibliographiques

- 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.
- Raoult, J.-F., & JF, R. (1974). Géologie du centre de la chaîne numidique (Nord du Constantinois, Algérie).
- 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 hydrogéologique et géophysique)*. Ministère de l'Équipement et de l'Amenagement 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.
- Šumanovac, F., & Weisser, M. (2001). Evaluation of resistivity and seismic methods for hydrogeological mapping in karst terrains. *Journal of Applied Geophysics*, 47(1), 13-28.
- Tabeche, M. (2009). les eaux des gouffres du Boussouil. Retrieved from <https://djurdjura.over-blog.net/article-28094069.html> website:
- Tas, S. (2018). *Évaluation de l'état de la Biodiversité dans le Parc National du Djurdjura (PND)*. Université Akli Mohand Oulhadj De Bouira.
- Tikhonov, A. N., & Arsenin, V. I. (1977). *Solutions of Ill-posed Problems: Andrey N. Tikhonov and Vasilij Y. Arsenin. Translation Editor Fritz John*: Wiley.
- Valois, R. (2011). *Caractérisation structurale de morphologies karstiques superficielles et suivi temporel de l'infiltration à l'aide des méthodes électriques et sismiques*. Université Pierre et Marie Curie-Paris VI.
- Van Schoor, M. (2002). Detection of sinkholes using 2D electrical resistivity imaging. *Journal of Applied Geophysics*, 50(4), 393-399.
- Vogelsang, D. (1987). Examples of electromagnetic prospecting for karst and fault systems. *Geophysical prospecting*, 35(5), 604-617.
- Vouillamoz, J., Legchenko, A., Albouy, Y., Bakalowicz, M., Baltassat, J., & Al-Fares, W. (2003). Localization of saturated karst aquifer with magnetic resonance sounding and resistivity imagery. *Groundwater*, 41(5), 578-586.
- Waxman, M. H., & Smits, L. (1968). Electrical conductivities in oil-bearing shaly sands. *Society of Petroleum Engineers Journal*, 8(02), 107-122.
- Willimas, P. W. (2008). The role of the epikarst in karst and cave hydrogeology: a review.
- Xu, X.-P., & al. (2015). *Efficient extraction of macromolecular complexes from electron tomograms based on reduced representation templates*. Paper presented at the International Conference on Computer Analysis of Images and Patterns.
- Yakoub, B. (1985). *Contribution à l'étude hydrogéologique de la Kabylie occidentale(Algérie)*.
- Zeghid, K. (2013). *Cartographie de la vulnérabilité à la pollution des eaux souterraines karstiques. Cas de bassin versant du Meffrouche*. Magister en Ecologie et Environnement 2013, Université Abou Bekr Belkaid Tlemcen (UABT).
- Zhou, W., & al. (2002). Effective electrode array in mapping karst hazards in electrical resistivity tomography. *Environmental geology*, 42(8), 922-928.

Références Bibliographiques
