

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE

وزارة التعليم العالي و البحث العلمي

MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE

جامعة أبي بكر بلقايد - تلمسان

UNIVERSITE ABOUBAKR BELKAÏD-TLEMEN

FACULTE DES SCIENCES DE LA NATURE, DE LA VIE, DES SCIENCES
DE LA TERRE ET DE L'UNIVERS

DEPARTEMENT DES SCIENCES DE LA
TERRE ET DE L'UNIVERS



MEMOIRE DE FIN D'ETUDES

Présenté pour l'obtention du **diplôme de Master académique**

Département de sciences de la terre et de l'univers

Spécialité : Hydrogéologie

Présenter par : Fandi Ikram Fatiha et Ghomari Chaimaa

Méthodes géophysiques appliquées à la recherche des ressources en eau en pays karstiques

Soutenu en septembre 2023, devant le jury composé de :

Mr BOUDJEMAA Abderrazek	M.C.A	Univ. Tlemcen	Président
Mr KERZABI Rachid	M.A.A	Univ. Tlemcen	Examineur
Mr BENCHOUK Mustapha	M.A.A	Univ. Tlemcen	Encadrant

Remerciements

Tout d'abord, Nous tenons à remercier DIEU le miséricordieux de nos avoir donné le courage, la force, la volonté et la patience afin d'accomplir ce modeste travail, et d'atteindre notre objectif.

Nous adressons notre remerciement et gratitude à notre encadreur de mémoire **Mr BENCHOUK Mustapha**, Docteur en à l'Université de Tlemcen qui nous a permis de réaliser cette étude. On lui témoigne nos profondes reconnaissances pour son précieuse attention et l'honneur qu'il nous a fait en acceptant de diriger notre travail, et pour l'orientation, la confiance, la patience qui ont constitué un apport considérable sans lequel ce travail n'aurait pas pu être mené au bon port.

Nos vifs remerciements vont également à tous les profs, qui nous a fait l'honneur d'examiner notre travail et de l'enrichir par leurs propositions.

Ainsi qu'à toute personne qui nous a aidés scientifiquement et moralement, Tous qui nous ont enseigné un jour, nous avons grandement apprécié votre soutien, votre implication et votre expérience pour accéder à ce niveau. A tous, veuillez accepter nos remerciements, nos grâces, l'expression de nos hautes considérations et l'assurance de nos profonds respects.

Dédicaces

Avec l'expression de ma reconnaissance je dédie ce modeste travail à ceux qui, quels que soient les termes embrassés, je n'arriverais jamais à leur exprimer mon amour sincère.

A Ma mère, ma vie <<Bahia>> autant de phrases aussi expressives soient elles ne sauraient montrer le degré d'amour et d'affection que j'éprouve pour toi. Tu m'as comblé avec ta tendresse et ton affection tout au long de mon parcours. Tes prières sont toujours la raison de ma réussite. Puisse dieu le tout puissant te donner santé, bonheur et longue vie afin que je puisse te combler à mon tour.

A très cher père <<Yazid >> tu as su m'inculquer le sens de la responsabilité, de l'optimisme et de la confiance en soi face aux difficultés de la vie. Je te dois ce que je suis aujourd'hui et ce que je serai demain. Que dieu te préserve, t'accorde santé, bonheur et te protège de tout mal.

A ma chère sœur << Imen >> et cher frère << Anes >> je vous souhaite tous le bonheur dans votre vie, que dieu vous préserve santé et longue vie je vous aime.

A mon fiancé << Naguib El Hadi >> merci pour ton soutien inestimable, financier, matériel, moral et tes conseils aussi nobles, pour ma réussite. Merci infiniment pour ton accompagnement, retrouve ici ma profonde gratitude. Merci d'être un bon mari, je suis très reconnaissant merci.

A ma grand-mère maternel pour ton attention particulière, tes prières et ton amour inconditionnel que dieu te garde parmi nous et te donne bonne santé et longue vie.

Particulièrement à toi, **ma partenaire, ma véritable amie et sœur << Chaimaa >>**, je voulais te dire qu'avec toi ma chérie aucun chemin n'apparaît difficile. Malgré les difficultés rencontrées au long de l'année, celle-ci fut pleins de bon moments avec toi et ce fut un réel plaisir de travailler à tes côtés pour préparer ce mémoire. Je te souhaite tous le bonheur du monde. Puisse dieu garder toujours notre amitié et fidélité tel qu'elle est aujourd'hui.

A Toute la famille **FANDI** et **GHOMARI**. Mes professeurs qui doivent voir dans ce travail la fierté d'un savoir bien acquis. Tous mes chers qui m'ont tant apporté. Toute personne qui a contribué de près ou de loin à la réalisation de ce mémoire. **Et enfin à toutes personnes non-voyantes que ce petit effort soit une étincelle de l'hommage qu'on éprouve envers vous.**

Fandi Ikram Fatiha

Dédicaces

Je dédie ce modeste travail

A très chère maman <<**Fatima**>> qui m'a soutenue et encouragé durant ces années d'études .Merci d'être derrière moi toute ma vie.

A mon très chère père <<**Amine**>> tu as toujours été à mes côtés pour me soutenir et m'encourager merci pour tes conseils merci pour tout.

A mon mari <<**Chems Eddine**>> ,merci pour ton soutien inestimable ,financier moral et tes conseils aussi nobles pour ma réussite Merci infiniment pour ton accompagnement.

Mes chers frères <<**Safaa ,Salah , Monsef et Meriem et le petit Wassim**>> ,en témoignage de ma gratitude et mon profond respect, merci d'être à mes côtés je vous souhaite la réussite dans vos vies .

Je vous aime ma très familles.

Particulièrement à toi, **ma partenaire, ma véritable amie et sœur << ikram>>**, je voulais te dire qu'avec toi ma chérie aucun chemin n'apparaît difficile. Malgré les difficultés rencontrées au long de l'année, celle-ci fut pleine de bons moments avec toi et ce fut un réel plaisir de travailler à tes côtés pour préparer ce mémoire. Je te souhaite tous le bonheur du monde. Puisse dieu garder toujours notre amitié et fidélité tel qu'elle est aujourd'hui

Ghomari chaimaa

Résumé :

Le karst fascine les amateurs et les professionnels par ses formes très diversifiées, qui débent à la surface, et qui se prolongent à des profondeurs vertigineuses encore vierges de toute exploration. De nombreuses communautés scientifiques tentent encore de percer ses secrets et de proposer des clés pour en expliquer le fonctionnement passé et actuel. Outre ses expressions morphologiques remarquables, ses ressources en eau potable en font un enjeu très important, notamment dans la région méditerranéenne où ce type d'aquifère est très présent et les besoins en eau potable conséquents. En Algérie, et précisément au niveau régional, Les Monts de Tlemcen constituent l'un des massifs carbonatés karstiques les plus importants de l'Algérie du nord. Ils contiennent d'importants aquifères contenus dans les formations calcaréo-dolomitiques du jurassique supérieur. L'aquifère karstique, en raison de ces caractéristiques si particulières, est sans conteste, l'aquifère qui présente les difficultés d'étude les plus grandes. La karstification apparaît comme un phénomène évolutif, qui conduit de l'aquifère carbonaté, uniquement fissuré, à l'aquifère karstique où existe une organisation complète des écoulements. Les méthodes de prospection géophysique ont pour objectif de caractériser les variations de certains paramètres physiques des terrains du sous-sol, afin d'obtenir des informations géologiques sur leur nature et leurs propriétés. Ces méthodes constituent un des outils les plus utilisés pour définir les ressources en eau dans des milieux poreux et fissurés. Tandis que plusieurs études ont montré l'intérêt des applications de la géophysique à des structures karstiques, ces méthodes ne sont toujours pas systématiquement utilisées aux études hydrogéologiques.

Mots clés : Karst, Monts de Tlemcen, Méthode de prospection géophysique, Hydrogéologie, Aquifère, structures karstiques.

Abstract :

The karst fascinates amateurs and professionals with its very diverse forms, which begin at the surface, and which extend to dizzying depths still untouched by any exploration. Many scientific communities are still trying to unlock its secrets and offer keys to explain the past and current functioning of a karstic system. In addition to its remarkable morphological expressions, its drinking water resources make it a very important issue, especially in the Mediterranean region where this type of aquifer is very present and the drinking water needs are substantial. In Algeria, and precisely at the regional level, the Monts de Tlemcen constitute one of the most important carbonated karstic massifs of northern Algeria. They contain important aquifers contained in the calcareo-dolomite formations of the Upper Jurassic. The karstic aquifer, because of these particular characteristics, is undoubtedly the aquifer that presents the greatest study difficulties. Karstification appears as an evolutionary phenomenon, which leads from the carbonated aquifer, only fissured, to the karstic aquifer where there is a complete organization of flows. The purpose of geophysical prospecting methods is to characterize the variations of certain physical parameters of the subsoil, in order to obtain geological information on their nature and their properties. These methods constitute one of the most used tools for defining water resources in porous and fissured environments. While several studies have shown the interest of the applications of geophysics to karstic structures, these methods are still not systematically used in hydro geological studies.

Keywords : karst, Monts de Tlemcen, Geophysical prospecting method, Hydrogeology, Aquifer, karst structures.

ملخص

تبهير الكارست الهواة والمحترفين بأشكالها المتنوعة للغاية، والتي تبدأ من السطح وتمتد إلى أعماق مذهلة لم يمسه أي استكشاف. لا تزال العديد من المجتمعات العلمية تحاول كشف أسرارها وتقديم مفاتيح لشرح الأداء السابق والحالي لنظام الكارست. وبالإضافة إلى مظاهرها المورفولوجية الرائعة، فإن مواردها من مياه الشرب تجعلها قضية مهمة للغاية، لا سيما في منطقة البحر الأبيض المتوسط حيث يتواجد هذا النوع من طبقات المياه الجوفية بشكل كبير وتكون الاحتياجات من مياه الشرب كبيرة. وفي الجزائر، وعلى المستوى الإقليمي تحديداً، تشكل جبال تلمسان واحدة من أهم الكتل الكربونية الكارستية في شمال الجزائر. وهي تحتوي على طبقات مياه جوفية مهمة موجودة في تكوينات الدولوميت الكلسية في العصر الجوراسي العلوي. إن طبقة المياه الجوفية الكارستية، بسبب هذه الخصائص الخاصة جداً، هي بلا شك طبقة المياه الجوفية التي تمثل أكبر صعوبات الدراسة. ويبدو أن الكارستية هي ظاهرة متطورة، تمتد من طبقة المياه الجوفية الكربونية، وهي متشعبة فقط، إلى طبقة المياه الجوفية الكارستية حيث يوجد تنظيم كامل للتدفقات. الهدف من طرق التنقيب الجيوفيزيائية هو تحديد خصائص الاختلافات في بعض المعالم الفيزيائية للتضاريس تحت الأرض، من أجل الحصول على معلومات جيولوجية عن طبيعتها وخصائصها. تشكل هذه الطرق واحدة من أكثر الأدوات المستخدمة لتحديد الموارد المائية في البيئات المسامية والمتشعبة. في حين أظهرت العديد من الدراسات الاهتمام بتطبيقات الجيوفيزياء على الهياكل الكارستية، إلا أن هذه الأساليب لا تزال غير مستخدمة بشكل منهجي في الدراسات الهيدروجيولوجية.

الكلمات المفتاحية: الكارست، جبال تلمسان، طريقة التنقيب الجيوفيزيائية، الهيدروجيولوجيا، طبقات المياه الجوفية، الهياكل الكارستية.

Table des matières

Liste des figures	
Liste des tableaux	
Introduction générale	02
<i>Chapitre I : Présentation générale du karst et du système karstique</i>	
1 .Généralités	04
2 .Géomorphologie	05
3. Hydrogéologie	05
4. Morphologie	05
5. Le phénomène de karstification	07
6. Les roches carbonatées.....	08
6.1 Les calcaires	08
6.2 Les craie	08
6.3 Les roches dolomitiques	08
7. Les formes karstiques.....	09
7.1L'Exokarst	09
7.1.1 Les lapiés	09
7.1.2 Couloirs	11
7.1.3 Dolines.....	11
7.1.4 Poljé.....	11
7.1.5 Canyons, reculées, vallées avengles ou a éclipses	12
7.2 Endokarst.....	13
7.2.1 Les avens	13
7.2.2 Les pertes	13
7.2.3 Les stalactites	13
7.2.4 Les stalagmites.....	13
8. Les eaux souterraines karstiques.....	13
8.1 La zone d'infiltration.....	13

8.2 La zone noyée	14
9 .Concept de la vulnérabilité spécifique et intrinsèque.....	15
10. Les sources karstique	15
11. L'importance du karst	15
11.1 Le karst dans le monde	15
11.2 Le karst sur le pourtour méditerranéen.....	16

Chapitre II : Les formations karstiques des Monts de Tlemcen

1. Introduction	18
2. Une karstification de surface et souterraine.....	19
2.1La situation géographique et géologique des Monts de Tlemcen	19
2.2 Les aspects de la karstification profonde	24
3. Karsts des Monts de Tlemcen	25
3.1 Pluviomètre.....	25
3.2 Les formes karstiques inventoriées.....	26
4. Hydrogéologie	29
4.1 Vulnérabilité a la pollution des eaux souterraines et pratique de la spéléologie.....	30
4.2 L'importance des eaux karstiques dans l'approvisionnement en eau de la population de Tlemcen	31
4.3 Les forages récents dans les aquifères karstiques des Monts de Tlemcen	32
4.4 Forages hydrauliques et nature des formations traversées et des formations carbonatées	33
5. Conclusion.....	34

Chapitre III : Les Méthodes de prospection géophysique

1. Introduction	39
2. L'hydrogéophysique	39
2.1 Apports de l'hydrogéophysique en milieu karstique	39
3. Les méthodes de prospection.....	43
3.1 Méthode géophysique et technique de mesure	43

3.2 Méthode hydrogéologique	43
3.3 Choix des méthodes	44
4. Prospection géophysique appliqué a l'hydrogéologie-hydrophysique.....	44
4.1 Méthode sismique	45
4.1.1 Matériel utilisés.....	46
4.1.2 Stratégie de mesures.....	47
4.2 Méthode tomographie électrique	48
4.2.1 Définition.....	48
4.2.2 Principe.....	49
4.2.3 Matériel utilisé	50
4.2.4 Stratégie de mesure ERT	51
4.3 Gravimétrie.....	52
4.3.1 Définition.....	52
4.3.2 Principe.....	52
4.3.3 Matériel utilisé	53
4.3.4 Stratégie de mesure	54
4.4 Géoradar	55
4.4.1 Définition.....	55
4.4.2 Principe.....	55
4.4.3 Matériel utilisé	55
4.5 Résonance magnétique des protons.....	57
4.5.1 Définition.....	57
4.5.2 Principe	57
4.5.3 Matériel utilisés.....	58
4.5.4 Stratégie de mesure	59
5. Interprétation couplée.....	60
6. Objectif de la géophysique appliqué sur le karst	61
6.1 Les limites de l'aquifère	61
6.2 Les discontinuités structurelles	61

6.3 Les passages préférentiels de l'eau ou concentrations des infiltrations	61
6.4 Les cavités vides	62
6.5 Les cavités pleines d'eau	62
7. Conclusion.....	63
Conclusion général	65
Références Bibliographiques	67

Liste des figures :

Figure I.1 : structure karstique.....	04
Figure I.2 : Bloc diagramme représentant un paysage karstique synthétique (Bakalowicz, 1999) .	06
Figure I.3 : Représentation schématique de l'évolution d'un aquifère karstifiable fissuré vers un aquifère karstique [inspiré de Dörfliger et al., 2010]	07
Figure I.4 : Schéma représentatif de la zone épikarstique (Mangin,1975).....	10
Figure I.5 : Quelques formes coyrantes de lapiés (d'après Collignon, 1988 Et Nicord,1970)	10
Figure I.6 : Schéma conceptuel du karst de fontaine de Vaucluse	10
Figure I.7 : Structure des dolines et formes fréquentes	11
Figure I.8 : Cours d'eau aériens des zones karstiques (Gilli,2011)	12
Figure I.9 : Cartographie mondiale des formations karstifiées affleurantes (d'après Gunn,2004 dans Ford et Williams,2007)	16
Figure I.10 : Carte des affleurements des ensembles karstiques (en bleu) autour de la Méditerranée (Bakalowicz et Dorfliger,2005)	17
Figure II.1 : Carte géologique régionale simplifiée (d'après la carte géologique de l'Algérie au 1/500000)	18
Figure II.2 : Coupe géologique simplifiée nord-sud à travers les Monts de Tlemcen [d'après Collignon, 1986 et Achachi, 1996, modifiée	19
Figure II.3 : Log lithostratigraphique synthétique de la région étudiée [d'après Benest et al.,1999].....	20
Figure II.4 : carte géologique simplifiée de la région de Tlemcen. Les limites d'affleurements sont reprises à partir de la carte géologique de F. Doumergue, Feuille Tlemcen au 1/50000, 1926	21
Figure II.5 : Coupe géologique simplifiée de la région de Tlemcen.....	22
Photo 1 : La dissolution partielle rend les dolomies vacuolaires et leur donne un aspect ruiniforme.....	23
Photo 2 : Versant d'abondantes constitué de dolomies de Tlemcen, avec formation d'abondantes arènes très sableuses. D'innombrables petits avens se sont formés. Parfois on peut voir des arbres qui y ont pris racine grâce à l'existence d'un matériau meuble retenant l'eau	23
Photo 3 : poljé de terni vu à partir du sud. En premier plan, nous observons les marno-calcaires de Raourai, en dernier plan les dolomies de Terni	24
Figure II.6 : carte de la pluviométrie moyenne annuelle dans l'Ouest algérien (Laborde, modifié).....	25
Figure II.7 : situation des principales formes karstiques des monts de Tlemcen.....	28

Photo 4 : Résurgence de ghar boumaaza en crue (photo F.Bensaoula).....	30
Figure II.8 : Les principaux Karst d'Algérie (Collignon, 1991).....	31
Figure II.9 :Plan de situation des forages à travers les monts de Tlemcen.....	34
Figure III.1 : Principe de la méthode sismique.....	46
Figure III.2 : La sismique réfraction.....	47
Figure III.3 : Le principe de la sismique.....	48
Figure III.4 :Distribution du courant créé par deux électrodes dans un sol homogène et isotrope [Astier, 1971, dans Chapelier, 2000.....	50
Figure III.5 : Dispositifs d'acquisition ERT utilisés et calculs associés, avec x le positionnement de la mesure le long du profil, PsZ la pseudo profondeur d'investigation et K le facteur géométrique ...	51
Figure III.6 : Dispositif de mesure de tomographie électrique.....	52
Figure III.7 : Principe de fonctionnement de la gravimétrie.....	55
Figure III.8 : Matériel utilisé. (A) Gravimètre CG5 ; (B) Gravimètre FG5.....	56
Figure III.9 : Principe du GPR.....	51
Figure III.10 : Le radar géologique.....	59
Figure III.11 : Le matériel utilisé pour la résonance magnétique.....	61

Liste des tableaux :

Tableau I.1 : Roches carbonatées	08
Tableau I.2 : Roches dolomitiques.....	09
Tableau II 1 : Etat des réalisations de forages à travers les monts de Tlemcen (Bensaoula et al. 2003)	32
Tableau III.1 : Méthodes et techniques géophysiques usuelles de surface pour l'hydrogéologie [d'après Kearey et Brooks, 1984 ; Vouillamoz, 2003 ; Chalikakis, 2006]	42

INTRODUCTION GENERALE

Introduction générale

De Karst, nom allemand de la zone des plateaux calcaires du nord-ouest de la péninsule balkanique entre la Carniole et l'Istrie (**Bakalowicz, 2002**), répartie en nombreux endroits sur la planète, les formations sédimentaires carbonatées qui affleurent peuvent receler des aquifères karstiques. Ces zones de circulations souterraines des eaux peuvent alors constituer des réservoirs potentiels en eaux, notamment pour l'alimentation en eau potable (**Pranville et al, 2007**).

Les Monts de Tlemcen sont un véritable château d'eau dans l'Ouest de l'Algérie, une région peu arrosée et qui est frappée plusieurs fois par siècle par des épisodes de déficit pluviométrique prolongé. Pour faire face à ces périodes de sécheresse, l'un des meilleurs atouts de la région est l'existence de grands aquifères karstiques. Leurs réserves renouvelables (la charge) sont importantes mais déjà largement mobilisées. Par contre, les réserves permanentes (le stock) ne font pas l'objet d'une gestion stratégique, alors qu'elles permettraient de couvrir les besoins pendant les épisodes de sécheresse pluriannuelle.

Les techniques d'étude classiquement utilisées en hydrogéologie sont généralement infructueuses dans un milieu aussi hétérogène et complexe que le karst [Bakalowicz, 2005]. Les hydrogéologues du karst font souvent appel à des techniques se rapprochant de l'hydrologie de surface telles que le traçage naturel et artificiel ou la modélisation pluie/débit. Ces techniques d'étude ont permis de comprendre une partie des mécanismes de régulation des flux d'eau au sein des systèmes karstiques. Cependant, elles permettent difficilement de localiser la ressource en eau au cours de son cheminement à travers le système karstique.

La géophysique est un mode de prospection géologique non destructif qui apporte des informations spatialisées et temporelles. De nombreuses techniques géophysiques sont actuellement disponibles et présentent chacune des avantages et des limites, c'est pourquoi elles sont souvent utilisées de manière complémentaire. L'hydrogéophysique consiste à utiliser les outils géophysiques pour étudier les mécanismes liés à l'eau. Ces outils peuvent donc être utilisés pour mieux comprendre le fonctionnement des hydro systèmes karstiques et offrir une vision complémentaire avec les méthodes classiques d'étude des systèmes karstiques.

CHAPITRE I

Présentation générale du Karst et du système karstique

Nous allons débiter ce chapitre par une présentation générale du karst et du système karstique, de sa structure et son fonctionnement, de ses ressources en eau ainsi que des problèmes liés à leurs exploitation. Le rôle de la géophysique pour la connaissance de ce milieu hétérogène et anisotrope ainsi que les objectifs de ce mémoire y seront ensuite présentés.

1. Généralités :

Plusieurs définitions ont été proposées pour bien désigner les processus résultant de l'action dissolvante de l'eau sur certains types de roche.

Le mot "karst" est un toponyme allemand décrivant une zone géographique qui s'étend globalement de la région de Trieste en Italie, jusqu'en Istrie (Croatie). De nombreux auteurs se sont succédé pour fournir une définition à ce que l'on appelle aujourd'hui le karst [Martel, 1902 ; Cvijic, 1960 ; Mangin, 1975 ; Bakalowicz, 1999]. Le karst est un terme qui décrit les formes superficielles et souterraines résultant de l'altération des roches carbonatées (calcaire, dolomie) et salines (gypse, halite, anhydrite). Leur altération est principalement liée au phénomène de dissolution de la roche, ce qui donne naissance à des paysages caractéristiques marqués par des avens, des grottes, des vallées sèches, des canyons ou encore des reliefs ruiniformes. Des formes assimilables au karst (ou pseudo-karst) sont observables en roches silicatées non carbonatées [Vicat et *al.*, 1995 ; 1997 ; Willems, 2000]. De nos jours, cette dénomination est encore discutée [In Simon, 2014].



Figure I.1 : structure karstique

2. Géomorphologie :

Une définition élargie peut faire intervenir toute roche soluble, au sein de laquelle l'eau peut s'infiltrer, poursuivre son action de dissolution en profondeur et dégager des vides durables.

Ceci impose d'une part que la roche possède une résistance mécanique suffisante pour éviter le foisonnement immédiat des vides, et d'autre part que les produits de la dissolution puissent être entraînés en dehors du système. Ces notions sont importantes car elles différencient le karst des autres modelés.

Des formes de dissolution de surface s'observent en effet pour la plupart des roches et en particulier dans le domaine intertropical ou basalte et granite s'altèrent facilement.

L'action de l'eau est cependant réduite en profondeur car les produits d'altération y comblent rapidement les vides créés. Des roches non carbonatées comme le gypse, le sel et certains grès sont solubles et peuvent donc donner naissance à des modelés comparables.

Le mot karst est alors parfois utilisé mais on préférera employer le terme de parakarst. Enfin l'action de l'eau chargée de calories peut dégager des vides souterrains dans les régions périglaciaires et donner naissance à des thermokarsts [Gilli, 2011].

3. Hydrogéologie :

Le karst étant issu de l'action de l'eau en surface et en profondeur on peut aussi aborder sa définition par l'hydrologue. Un karst est alors un terrain calcaire ou le réseau hydrographique de surface s'enfonce partiellement ou totalement et circule au sein de la masse rocheuse pour atteindre des aquifères alimentant des sources. L'ensemble zone d'infiltration, aquifère, émergence, constitue le système karstique [Gilli, 2011].

4. Morphologie :

La karstification des massifs rocheux donne naissance à des paysages pittoresques et caractéristiques. Le réseau hydrographique de surface est limité, les rares vallées présentes sont souvent asséchées [Nicod, 1972]. En revanche le réseau hydrographique souterrain constitué par le réseau de galeries peut être très actif. En surface, des dépressions fermées (dolines ou poljé ; Fig I.2) peuvent concentrer une partie des eaux créant des lacs temporaires avant que l'eau entre dans l'aquifère, le plus souvent par le biais d'une faille ouverte ou d'un aven. Dans les zones de lapiaz ou à proximité d'un aven, l'eau peut entrer plus rapidement dans l'aquifère karstique. [In Simon. D, 2014]

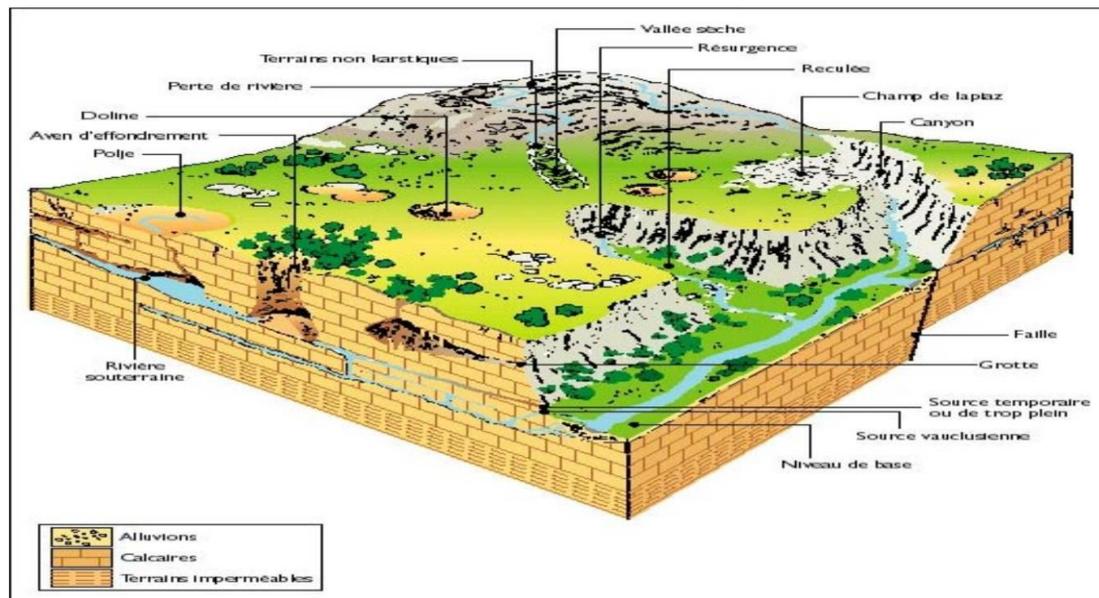


Figure I.2 : Bloc diagramme représentant un paysage karstique synthétique [Bakalowicz, 1999] [In Simon. D, 2014]

La variabilité des formes des reliefs karstiques est immense mais les éléments caractéristiques du karst slovène sont généralement associés :

- Des surfaces rocheuses sculptées par l'eau avec des formes souvent pittoresques, les lapiés.
- Des dépressions fermées (doline et poljés)
- La présence de grottes et de gouffres.
- La disparition fréquente des cours d'eau de surface en profondeur.
- Des sources peu nombreuses mais généralement puissantes.

L'importance relative de ces éléments peut être variable et certains d'entre eux peuvent être absents, selon la nature et la structure de la roche et selon les conditions climatiques.

Le relief karstique possède une composante de surface, l'exokarst (ou karst *stricto sensu*) et une composante souterraine, l'endokarst ou se situe le monde des cavernes. Si, comme les autres modelés, l'exokarst peut s'étudier depuis la surface ou l'espace, grâce aux observations directes ou à la télédétection, l'endokarst reste, par contre, invisible. Une partie est cependant accessible par les grottes et les gouffres, domaine de la spéléologie. On ne peut cependant pas résumer l'endokarst aux grottes car ces dernières ne sont que les vides karstiques accessibles à

l'homme. Pour le reste l'information ne peut être obtenue que par des moyens indirects tels que la géophysique, la géodésie, les études hydrogéologiques .La connaissance que nous pouvons en avoir dépend donc des avancées technologiques. [Gilli, 2011]

5. Le phénomène de karstification :

Les phénomènes de genèse et d'évolution des formes superficielles et souterraines des régions karstiques sont la dissolution des carbonates, qui est le phénomène majeur, et l'érosion mécanique [Gèze, 1973]. Le CO₂ gazeux se dissout dans l'eau créant une réserve d'acidité qui peut être entraînée rapidement en profondeur par des circulations d'eaux rapides. Cette eau acide circule dans les fractures, "attaque" la roche par dissolution et donne naissance à un réseau de galeries. Une érosion mécanique peut s'ajouter à la dissolution pour créer des conduits verticaux (Fig. I.3) ou des conduites forcées. Cette dissolution est principalement liée à une série de réactions triphasées équilibrées, entre les phases solide, gazeuse et liquide. Cet enchaînement de réactions est appelé "équilibres calcocarboniques". Son équation bilan [Roques, 1962] permet de constater que la dissolution de la roche est une réaction consommatrice de CO₂. [Simon. D, 2014]

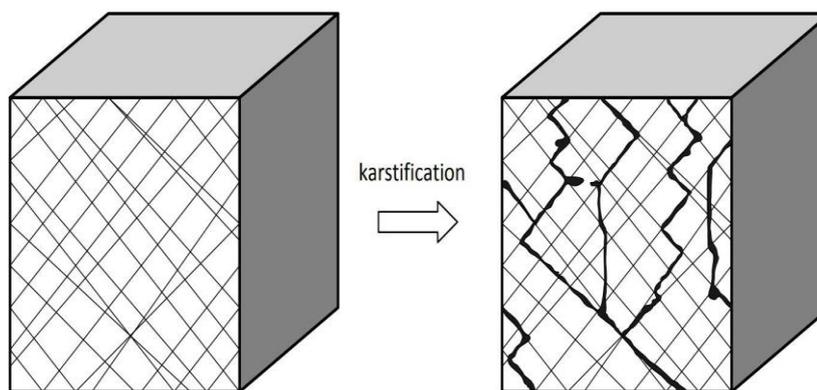
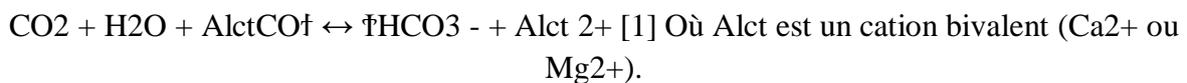


Figure I.3 : Représentation schématique de l'évolution d'un aquifère karstifiable fissuré vers un aquifère karstique [inspiré de Dörfliger et al, 2010]. [In Simon. D, 2014]

La [Figure I.3] résume de manière simplifiée l'évolution d'un aquifère fissuré karstifiable vers un aquifère karstique. Le réseau de conduits se développe par le biais de fractures, il est par endroit guidé par les stratifications mais la force de gravité joue aussi un rôle important qui mène à la formation de conduits verticaux.

6. Les roches carbonatées :

Les roches carbonatées sont constituées de minéraux caractérisés par la présence de l'ion CO_3^{2-} . Les minéraux les plus fréquents sont le carbonate de calcium $\text{Ca}^{2+} \text{CO}_3^{2-}$ (calcite aragonite) et le carbonate de calcium et magnésium $(\text{Ca}, \text{Mg})^{2+} \text{CO}_3^{2-}$ (dolomite). Le carbonate de calcium peut être présent sous deux formes minérales principales :

- La calcite (rhomboédrique) est la plus stable
- L'aragonite (orthorhombique) est fréquente dans le monde biologique ou elle forme
- la coquille de nombreux invertébrés, elle est moins stable et se transforme le plus souvent, progressivement, en calcite.

L'importance relative des carbonates et des autres minéraux (silicates) définit la vaste famille des roches carbonatées : calcaires, marnes, dolomies qui constituent environ 20% des roches sédimentaires du globe. L'essentiel des dépôts se fait en milieu marin. La présence des carbonates dépend des conditions physico-chimiques de l'eau de mer. [Gilli, 2011]

Roche	Calcaire Pure	Calcaire marneux	Marne	Argile calcareuse	Grès calcaire	Conglomérat
% CaCO_3	>95%	95 à 65%	<65%	<50%	variable	Variable

Tableau I. 1 : Roches carbonatées.

6. 1 Les calcaires :

Ils contiennent jusqu'à 65% de CaCO_3 , ils font effervescence à froid en présence d'HCL (10%) et sont rayables à l'acier. La diversité des calcaires est immense et plusieurs classifications ont été proposées selon l'origine ou la structure de la roche, qui peut contenir des éléments figurés, les allochèmes (coquilles, grains, débris) et un liant fin (micrite) ou cristallin (sparite). [Gilli, 2011]

6. 2 Les craies :

C'est une roche calcaire tendre et poreuse, formée par l'accumulation de coccolites, granules issus provenant d'algues planctoniques, les coccolithophoridés et de foraminifères. Elle est généralement très pure. Les dépôts de craie caractérisent des milieux de faible profondeur. [Gilli, 2011]

6. 3 Les roches dolomitiques :

CHAPITRE I :Présentation générale du Karst et du système karstique

Cette famille est composée de roches carbonatées comprenant une part plus ou moins importante de dolomite, carbonate de calcium et de magnésium (Ca,Mg,CO₃) à l’affleurement, la roche a souvent l’aspect d’une peau d’éléphant .L’effervescence en présence d’HCL (10%) à froid est nulle. à l’altération, les dolomies produisent un relief ruiniforme caractéristique, avec production de sable constitué des cristaux de dolomite, moins solubles que les cristaux de calcite.

La dolomitisation peut être primaire, lorsque la roche carbonatée se forme en milieu évaporitique, ou secondaire lors de la diagenèse, par circulation de fluides riches en magnésium. Elle peut ne concerner qu’une partie d’une unité calcaire.

La famille des roches dolomitiques s’étend entre le calcaire pur et la dolomie pure selon le pourcentage en dolomite.

La dolomitisation étant rarement totale, la dissolution du CaCO₃ d’une roche dolomitique laisse des vides qui donnent parfois une importante porosité à la roche.

Roche	Calcaire	Calcaire dolomitique	Dolomie calcareuse	Dolomie
%(Ca, Mg) CO ₃	<10%	10 à 50%	50 à 90%	>90%

Tableau I. 2 : Roches dolomitiques

7. Les formes karstiques :

7. 1 L’Exokarst :

7. 1. 1 Les lapiés :

Généralement en système karstique les formes de surface sont représentées par des lapiés, aussi appelé le lapiaz, ou karren, mot d’origine jurassienne. Leur profondeur varie de quelques millimètres à plus d’une dizaine de centimètres. Ils se développent plus dans les calcaires que dans les dolomies. Ils sont profonds dans les calcaires purs.

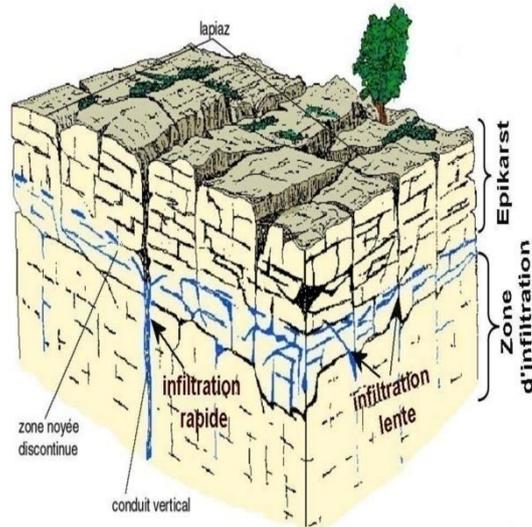
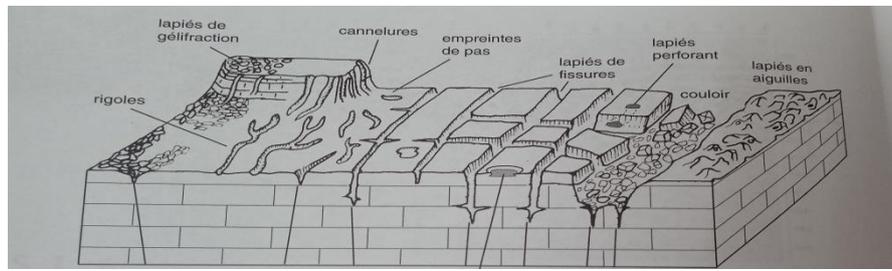


Figure I.4 : schéma représentatif de la zone épikarstique [Mangin, 1975] [In Simon. D, 2014]



**Figure I.5 : Quelques formes courantes de lapiés [d'après Collignon, 1988
Et Nicord, 1970] [In Simon. D, 2014]**

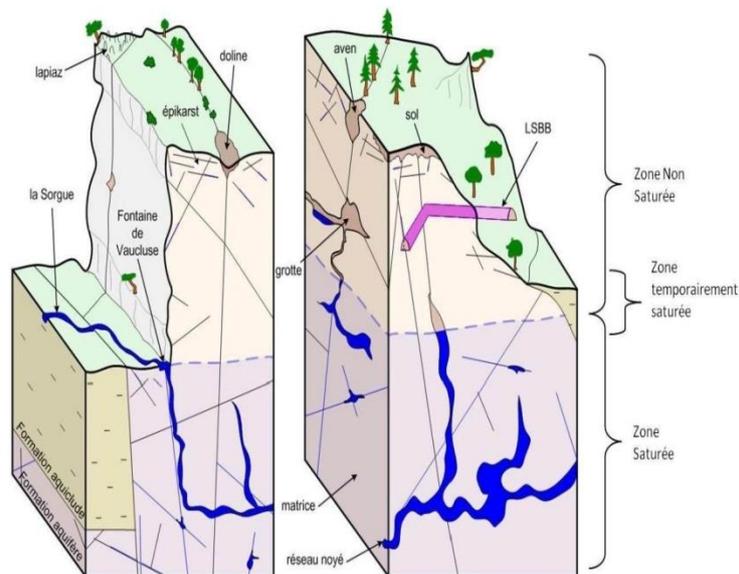


Figure I.6 : Schéma conceptuel du karst de Fontaine de Vaucluse [In Simon. D, 2014]

7. 1. 2 Couloirs :

Un important élargissement des lapiés des fissures ou de rigoles peut donner naissance à des couloirs profonds dans lesquels la progression humaine est possible. Des formes spectaculaires sont connues à Madagascar dans les secteurs du Bemaraha et de l'Ankarana, où les couloirs sont profonds de plusieurs dizaines de mètres. Certains couloirs peuvent résulter de la disparition du plafond d'une grotte, d'autres sont associés à des filons de basalte qui traversent le calcaire et favorisent la dissolution.

7. 1. 3 Dolines :

Les dolines sont une composante essentielle des reliefs karstiques tant sur le plan morphologique que sur le plan hydrologique. Ce sont des dépressions fermées plus ou moins circulaires, d'aspect et de taille variables entonnoirs naturels. Le fond des dolines est souvent occupé par des sols plus ou moins épais. Dans les zones karstiques du monde méditerranéen, elles constituent souvent les seules zones cultivables au milieu de champs de lapiés ou la roche à nu est stérile.

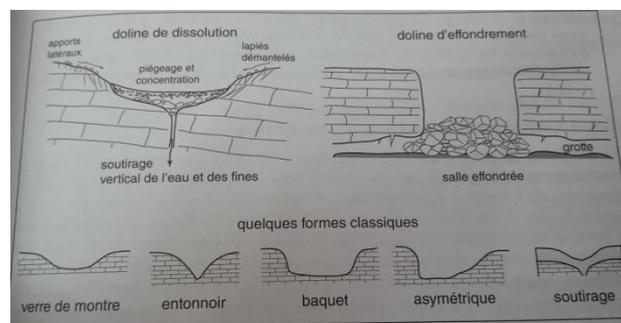


Figure I.7:Structure des dolines et formes fréquentes [Gilli, 2011]

7. 1. 4 Poljé :

Le poljé (en slave, plaine) est une vaste dépression fermée allongée et à fond plat, dominée par des versants rocheux très escarpés.

Le terme signifie en serbo-croate : champ (pas forcément en zone karstique), c'est-à-dire l'endroit où l'on peut cultiver. Il y a d'autres noms pour des formes semblables : plans (France), campo (Italie), ojos (Cuba). Les eaux superficielles se perdent dans des ponors- en lien avec un système de drainage souterrain- et ressortent à la faveur de résurgences après avoir parcouru des conduits et des galeries souterraines.

7. 1. 5 *Canyons, reculées, vallées aveugles ou à éclipses :*

Les zones karstiques peuvent être parcourues par des cours d’eaux aériens, plus ou moins connectés avec les écoulements souterrains. Les canyons, comme ceux du Verdon ou du Tarn, sont des gorges étroites qui entaillent la masse calcaire.

Il s’agit le plus souvent de cours d’eau puissants, d’origine allochtone, qui peut entailler la masse calcaire sans s’y perdre totalement.

Ils peuvent recouper des circulations souterraines et constituer alors le niveau de base de ces derniers, mais ils peuvent aussi être perchés au-dessus des nappes karstiques qu’ils alimentent alors partiellement par leurs pertes diffuses.

Les reculées sont des vallées qui naissent d’un cirque calcaire au pied duquel jaillit une source comme à la loue (Doubs), à Fontaine de Vaucluse ou au cirque d’Archiane dans le Vercors.

Les vallées aveugles sont des cours d’eau allogènes qui après un parcours aérien dans des gorges calcaires butent sur un cirque où ils se perdent en totalité.

Les vallées à éclipses sont une forme qui regroupe reculée et vallée aveugle.

Lorsque les calcaires sont peu épais, et les écoulements proches du substratum imperméable, des portions de vallées actives, entre des zones à parcours souterrain, peuvent s’observer comme au Parc de Rakov (Slovénie). Leur genèse est liée à l’effondrement des voutes des grottes sur de longues distances.

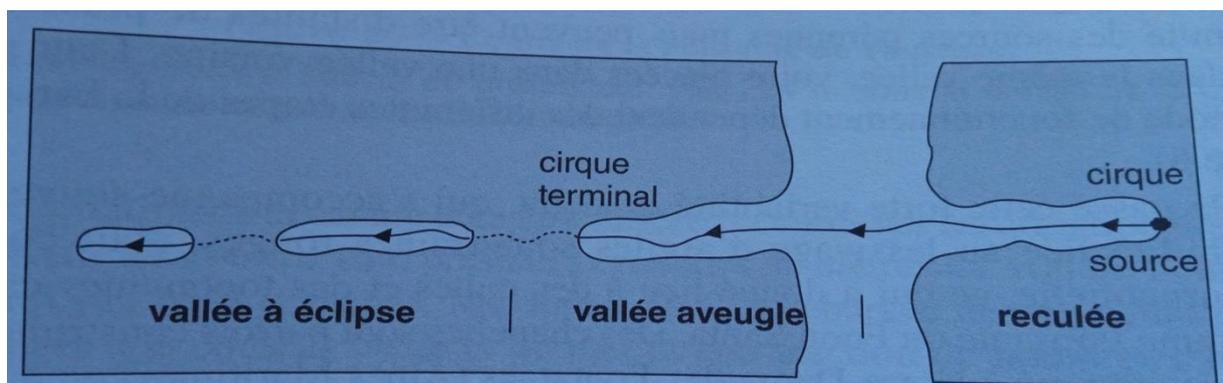


Figure I.8 : Cours d’eau aériens des zones karstiques [Gilli, 2011]

7. 2 Endokarst :

7. 2. 1 Les avens :

Ce sont des gouffres caractéristiques des régions karstiques. Ils sont le plus souvent formés par l'effondrement de la voûte d'une cavité souterraine au cours de la dissolution du calcaire. Un aven communique généralement avec une grotte souterraine et tout un réseau de galeries.

7. 2. 2 Les pertes :

Une perte est une ouverture par laquelle un cours d'eau devient souterrain après un trajet à l'air libre. Il ressortira par une résurgence.

7. 2. 3 Les stalactites :

Lorsqu'une goutte d'eau suinte au plafond d'une cavité, le dégazage qui se produit entraîne un dépôt de carbonate de calcium. Un petit tube va ainsi se former qui s'allonge et grossit au fur et à mesure de l'arrivée de l'eau à l'air libre.

7. 2. 4 Les stalagmites :

Lorsqu'une goutte d'eau tombe du plafond d'une grotte ou de l'extrémité d'une stalactite, elle contient encore du carbonate de calcium en dissolution. Lorsqu'elle arrive sur le sol, elle produit des éclaboussures qui déposent de fines particules minérales. Au point d'impact se crée alors une sorte de bosse qui, par accroissement progressif de son sommet, donnera une stalagmite.

8. Les eaux souterraines karstiques :

L'étude du comportement hydrodynamique et géochimique des eaux de systèmes karstiques a permis en particulier d'entrer dans le détail des mécanismes d'écoulement dans la zone d'infiltration et dans la zone noyée.

8. 1 La zone d'infiltration :

On distingue différents types d'infiltration :

- L'infiltration différée par un stockage à proximité de la surface dans l'épikarst ou l'eau est soumise aux processus biogéochimiques associés à l'évaporation, intervenant dans les sols ; cette infiltration s'oppose à l'infiltration directe, non soumise à ces processus.

- L'infiltration lente par laquelle un mélange d'air et d'eau parcourt les fines fissures et la porosité de la roche à l'origine de la dissolution de la roche carbonatée près de la surface.

L'infiltration rapide , qui correspond à un ruissellement souterrain parcourant les fractures les plus élargies par dissolution, responsable de la dissolution en profondeur, alimentée, d'une part, par des rivières s'écoulant sur des terrains non karstiques, se perdant au contact des calcaires, d'autre part, par l'arrivée d'eau d'infiltration dans les dépressions fermées connectées à des conduits. Ces dernières constituent en général les points d'absorption des eaux de « débordement » de l'épikarst.

8. 2 La zone noyée :

Elle assure les fonctions suivantes :

- Une fonction de drainage, assurée par un réseau de conduits hiérarchisé, écoulant très rapidement vers la source les eaux stockées dans la zone noyée, ainsi que les eaux reçues directement de la surface, surtout par les pertes.
- Une fonction de stockage, assurée par des vides karstiques parfois importants, les systèmes annexes au drainage, et par des zones fissurées, alimentant le réseau de drainage et recevant des eaux d'infiltration rapide.

Selon Bakalowicz (2010) le karst est un milieu qui présente des caractères très originaux. Nous citons dans ce qui suit quelques-uns de ces caractères :

La concentration des écoulements est à l'origine de sources au débit remarquable, permettant une exploitation en site unique de grands débits.

- Le temps de séjour et de transit des eaux souterraines dans le karst, globalement court, ne permet pas de filtration, ni d'autoépuration efficace.
- Les conditions d'écoulement régnant dans l'aquifère karstique favorisent le transport très rapide de pollutions depuis la surface ou depuis certains points particuliers de l'aquifère (cavités naturelles).
- Ce dernier caractère a fait considérer l'aquifère karstique, dans son ensemble, comme un milieu très vulnérable aux pollutions et à toutes les modifications subies par la surface (variation climatiques, changements de pratiques culturelles, modifications du couvert végétal,.....).

9. Concept de la vulnérabilité spécifique et intrinsèque :

Le concept de vulnérabilité peut se définir à 3 niveaux :

- Aptitude d'un système d'eaux souterraines à être contaminé ;
- Intégration de l'aptitude des eaux souterraines à propager et à conserver la contamination ;
- Prise en considération des caractéristiques polluantes du contaminant, ce qui fait appel aux concepts de normes et de seuils de toxicité.

10. Les 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.

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.

11. L'importance du karst :

Le karst est un environnement particulier et encore mal connu, ce qui pose un problème tant pour sa protection que pour son développement, qui nécessite souvent des études minutieuses, adaptées et personnalisées, dans le but de gestion équilibrée, orientée vers une préservation durable de la ressource, en qualité et en quantité.

11. 1 Le karst dans le monde :

Les formations carbonatées karstifiées affleurent sur 7 à 12 % de la surface des cinq continents [Ford et Williams, 2007]. Une part considérable de ces affleurements se localise à proximité de grands foyers de population : Asie du Sud, Amérique du Nord, Europe et pourtour méditerranéen (Fig. I.9). Près de 25 % de la population mondiale serait alimentée entièrement ou en partie par des ressources souterraines karstiques. [Ford et Williams, 2007]. [In Simon. D, 2014]

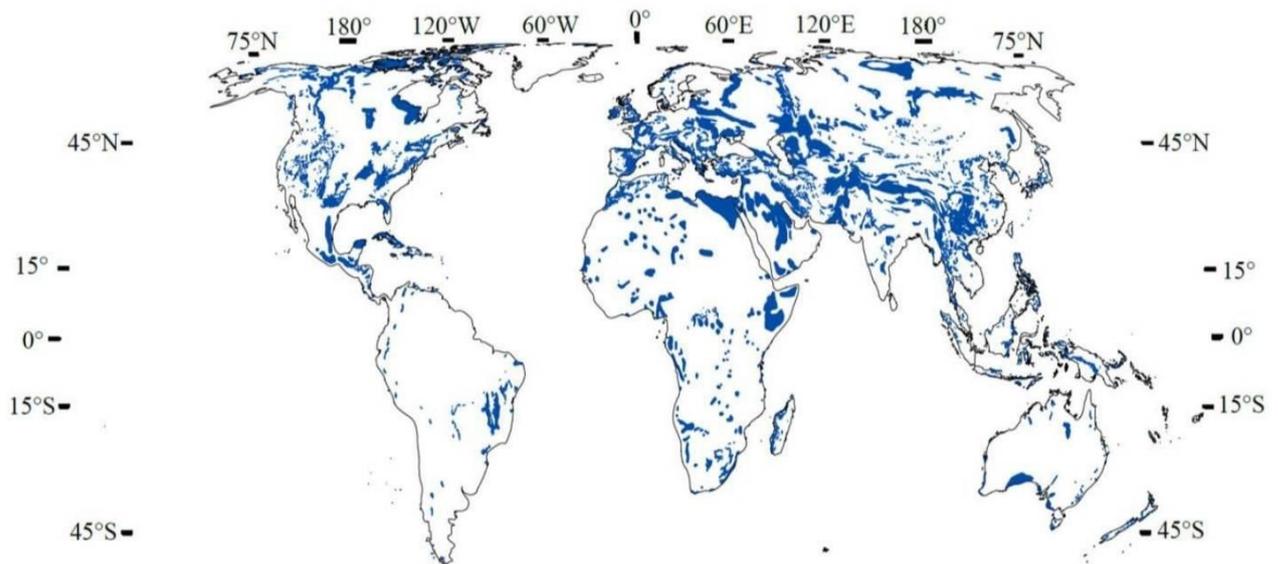


Figure I.9: Cartographie mondiale des formations karstifiées affleurantes [d'après Gunn, 2004 dans Ford et Williams, 2007] [In Simon. D, 2014]

11. 2 Le karst sur le pourtour méditerranéen :

Les roches carbonatées sont très présentes dans le bassin méditerranéen et affleurent selon les pays sur 30 à 70 % de la surface (Figure I.9) [Bakalowicz and Dörfli, 2005]. De plus, ces régions ont été soumises à des mouvements tectoniques (phase Pyrénéenne) et des variations du niveau de la mer très importantes (variations au cours du Quaternaire, crise de salinité au Messinien). Donc les conditions sont réunies pour que les aquifères karstiques de la région méditerranéenne renferment une partie importante des ressources en eau .Ils peuvent ainsi offrir des ressources de l'ordre de quelques dizaines de m³/s à plusieurs centaines de l/s. Toutes ces quantités d'eau peuvent satisfaire les agglomérations du pourtour méditerranéen qui souffrent, surtout lors de la période estivale, d'une importante pénurie d'eau. Bien que les formations karstiques constituent la principale formation aquifère de ces pays, le cas d'exploitation par gestion active, méthode d'exploitation durable qui veille à respecter les conditions de reconstitution des réserves, restent des exceptions [Bakalowicz et al, 2003]. Il est donc primordial de bien connaître ces systèmes pour pouvoir protéger et exploiter leurs ressources en eau. [CHALIKAKIS, 2006]

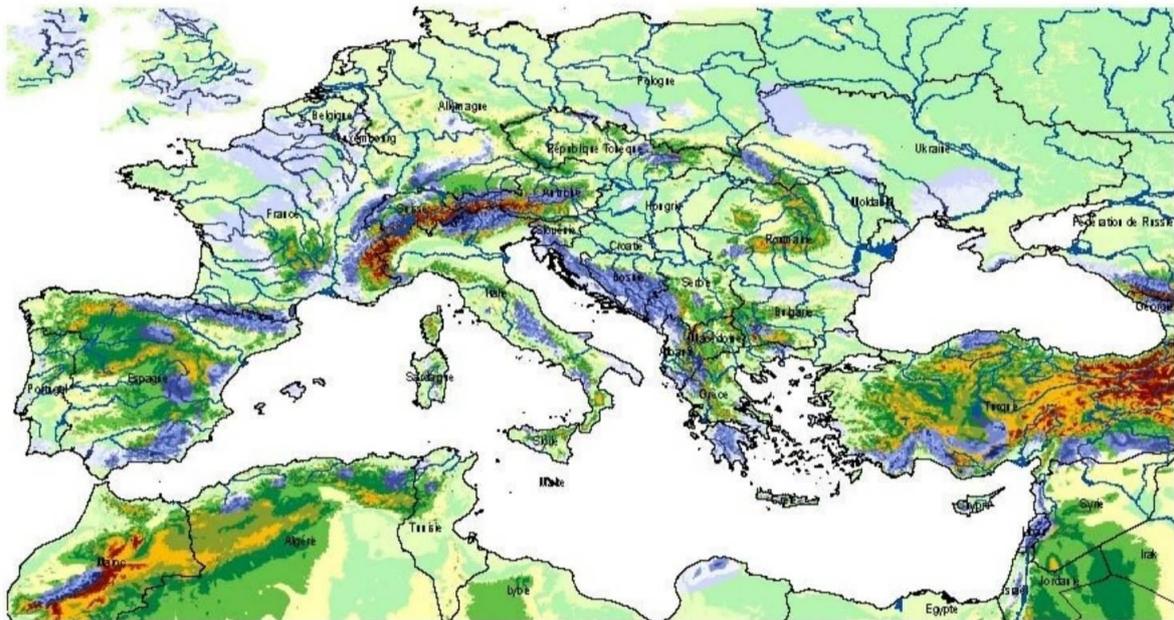


Figure I.10 : Carte des affleurements des ensembles karstiques (en bleu) autour de la Méditerranée [Bakalowicz et Dörfliger, 2005] [In Simon. D, 2014]

CHAPITRE I I

Les formations karstiques des Monts de Tlemcen

1. Introduction :

Les régions calcaires d'Algérie offrent une grande diversité de paysages, depuis les karsts bien arrosés des hautes montagnes de l'Atlas jusqu'aux affleurements peu karstifiés du désert du Sahara [Collignon 1991]. On observe des formations carbonatées dans des séries d'âges très variés qui couvrent toute l'échelle géologique, des temps les plus anciens, du Carbonifère (dans la région de Bechar), du Trias (nombreux affleurements de gypse et de sel à travers l'Algérie), du Jurassique et du Crétacé (massifs côtiers oranais, nappes telliennes, domaine tlemcénien, néritique constantinois, Atlas saharien), jusqu'au Miocène post-nappe (Djebel Murdjadjo, vallée du Chellif). Les Monts de Tlemcen constituent le massif carbonaté karstifié le plus étendu du nord-ouest algérien, après celui des Monts de Saïda. Les premiers indices de sa karstification ont été mis en évidence en 1880 lors des premiers travaux de terrassement du barrage du Meffrouch (situé à 8 km au sud de Tlemcen) où l'on vit la première crue de septembre s'engouffrer et disparaître dans les fouilles ouvertes du barrage [Gevin, 1952]. Le projet fut abandonné et ne put être repris qu'en 1946. Des observations analogues ont été faites lors des travaux de réalisation du barrage des Beni Bahdel, situé à 30 km au sud ouest de Tlemcen [Gautier, 1952]. Les nombreux travaux de forages, à travers les massifs carbonatés des monts de Tlemcen ont permis de mettre en évidence cette karstification et de l'analyser de manière quantitative.

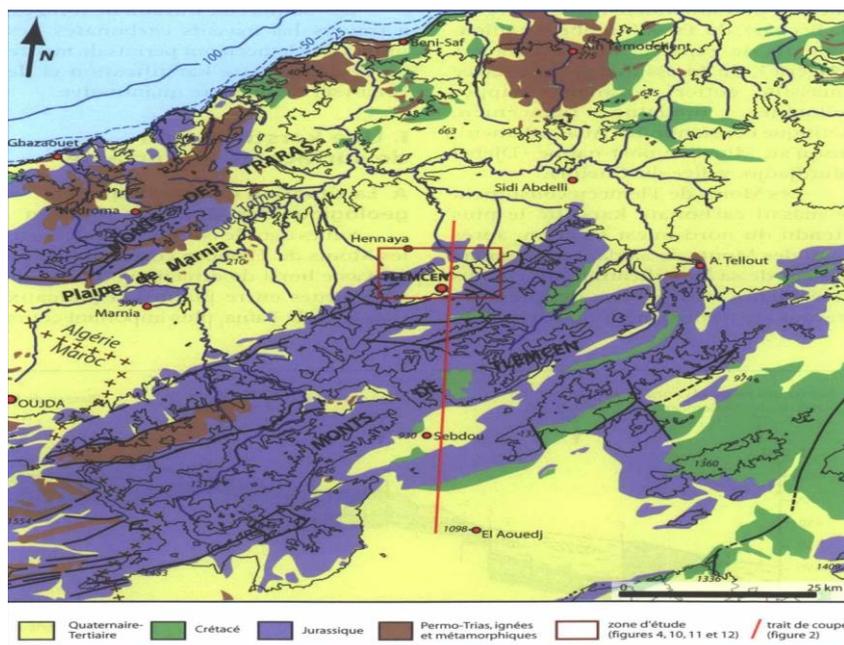


Figure II.1 : Carte géologique régionale simplifiée [d'après la carte géologique de l'Algérie au 1/500000].

2. Une karstification de surface et souterraine :

2.1 La situation géographique et géologique des Monts de Tlemcen :

Situés dans le Nord-Ouest algérien, les Monts de Tlemcen correspondent à un vaste horst de direction NE-SW. Ils sont situés entre plaines et plateaux (bassin de la Tafna, plus important cours d'eau de la région) au nord et une zone des hautes plaines au sud (zone steppique d'El Aricha). Leur altitude varie de 800 m à 1 400 m et le point culminant est à 1 843 m au Djebel Tenouchfi. Ils sont constitués essentiellement de formations d'âge jurassique supérieur et crétacé inférieur. Les calcaires et les dolomies du Kimméridgien et du Tithonien forment plus de 80 % des parties sommitales des plateaux. Au sud et au nord, ces formations sont masquées par une sédimentation néogène épaisse représentée par des marnes miocènes et des dépôts continentaux plio-quaternaires (figures II. 1 et II.2). La colonne lithostratigraphique (figure II. 3) montre la série des formations des Monts de Tlemcen. Deux membres de cette série correspondent à la grande majorité des aquifères karstiques :

- a) Le membre calcaréo-dolomitique inférieur qui fait 200 à 300 mètres d'épaisseur, composé des calcaires de Zarifet, des dolomies de Tlemcen, des calcaires de Stah ;

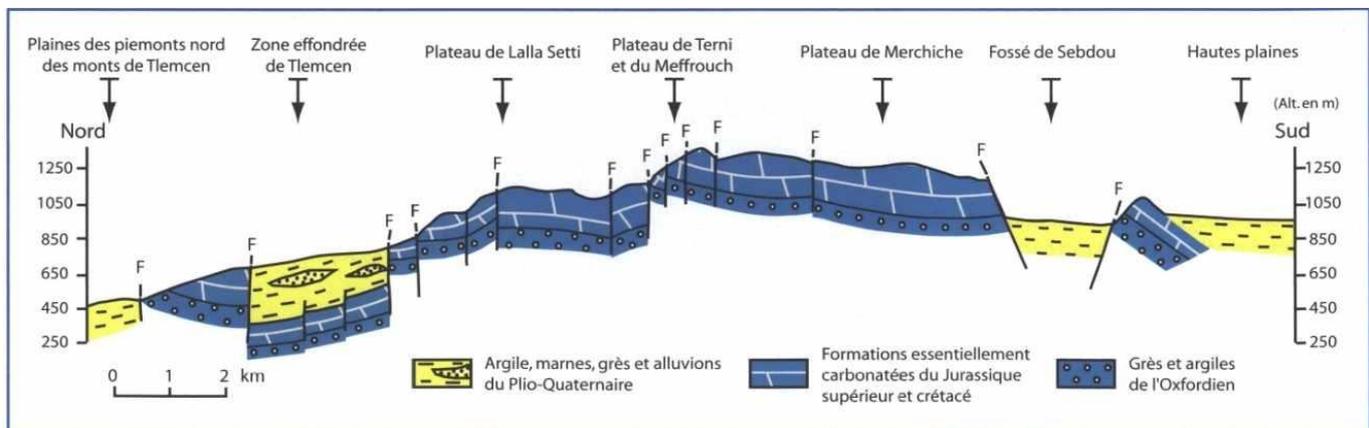


Figure II.2 : Coupe géologique simplifiée nord-sud à travers les Monts de Tlemcen [d'après Collignon, 1986 et Achachi, 1996, modifié] [In Bensaoula. F, 2007]

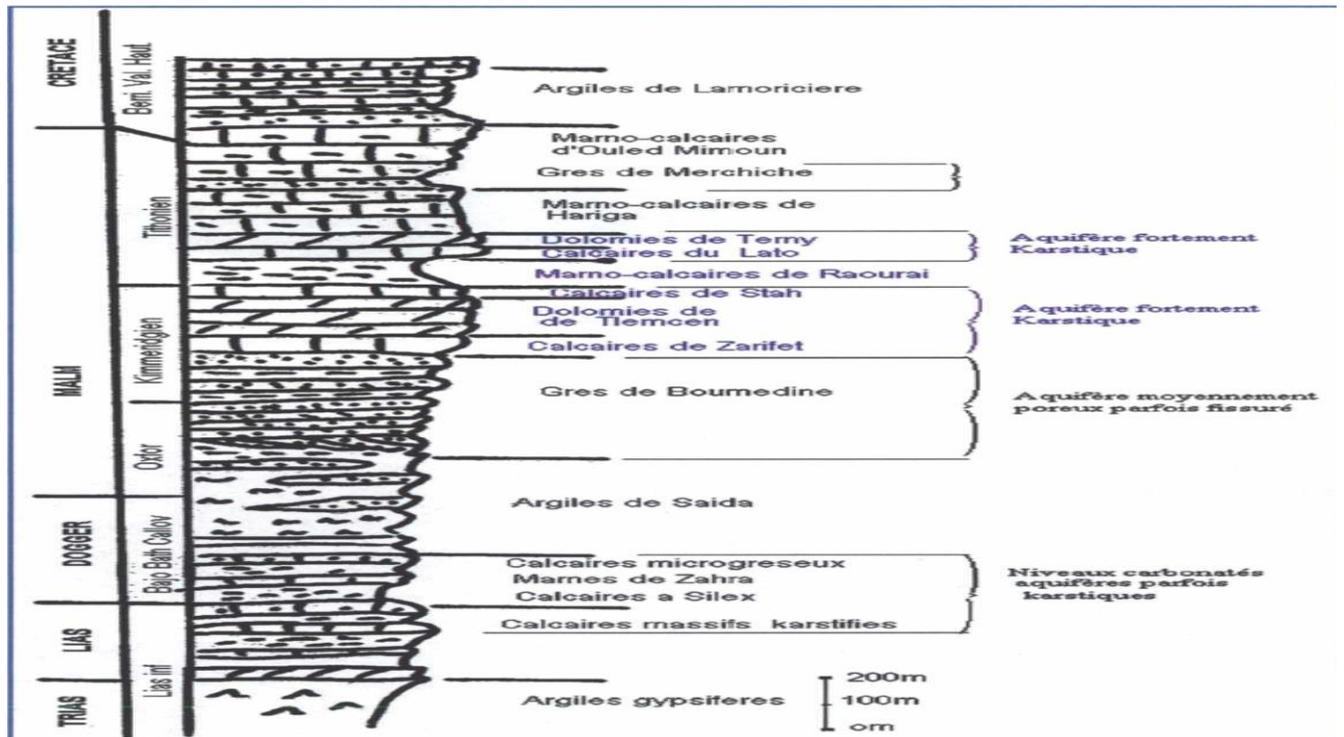


Figure II.3 : Log litho stratigraphique synthétique de la région étudiée [d'après Benest et al, 1999]

b) Le membre calcaréo-dolomitique supérieur qui fait 120 à 150 mètres d'épaisseur, composé des calcaires du Lato, des dolomies de Terny et d'une partie des marno-calcaires de Hariga parfois dolomitisés. Ces formations présentent des changements de faciès latéraux, des variations d'épaisseur ainsi qu'une dolomitisation très irrégulière, à travers les monts de Tlemcen. Il convient de dire que les deux membres carbonatés supérieur et inférieur sont dolomitisés au point parfois où la limite entre les formations calcaires de Zarifet, dolomies de Tlemcen, calcaires de Stah d'une part, et les calcaires de Lato et dolomies de Terni d'autre part, est impossible à voir. [Benest, 1985 ; Collignon, 1986 ; Bensaoula, 1992 et 2006] [In Bensaoula. F, 2007]

Les monts de Tlemcen sont surtout affectés par une tectonique distensive cassante par un système de failles longitudinales SW-NE à WSW-ENE (direction tellienne) avec formation de zones effondrées. Une tectonique compressive plus souple s'accompagne de la mise en place de structures plissées plus ou moins complexes.

Les prospections effectuées, tant par les méthodes géophysiques qu'hydrogéologiques, ont mis en évidence des niveaux aquifères dans les deux membres calcaréo-dolomitiques supérieur et inférieur tels qu'ils ont été définis plus haut. Ces aquifères sont par endroits captifs lorsque le karst est couvert (particulièrement sur les piémonts nord), et ils sont libres

sur les plateaux. D'innombrables sources drainent ces systèmes aquifères. [Collignon, 1986; Bensaoula, 2006] [In Bensaoula. F, 2007]

Le groupement urbain de Tlemcen se trouve sur les piémonts nord des Monts de Tlemcen et constitue l'agglomération la plus importante de la région ; c'est d'ailleurs le chef-lieu de la wilaya.

La plaine située en aval de Tlemcen s'étend sur une surface d'environ 110 km². Elle est limitée de toutes parts par des reliefs dont l'ossature est constituée de formations carbonatées d'âge jurassique au sud par le Djebel de Lalla Setti, à l'ouest par le Djebel Tefatisset et à l'est par le Djebel d'Oum El Allou. Au nord, elle s'étend jusqu'aux territoires d'Ain El-Hout et Ouzidan (Figure II. 4).

Cette plaine correspond structurellement à une zone effondrée (Figure II. 5) à la suite de jeu d'accidents verticaux de direction SWNE. Les formations carbonatées du Jurassique s'ennoient sous les dépôts mio-plio-quaternaires qui deviennent en général de plus en plus épais vers le nord, dans les piémonts des Monts de Tlemcen. Cette structure a été révélée par des prospections géophysiques.

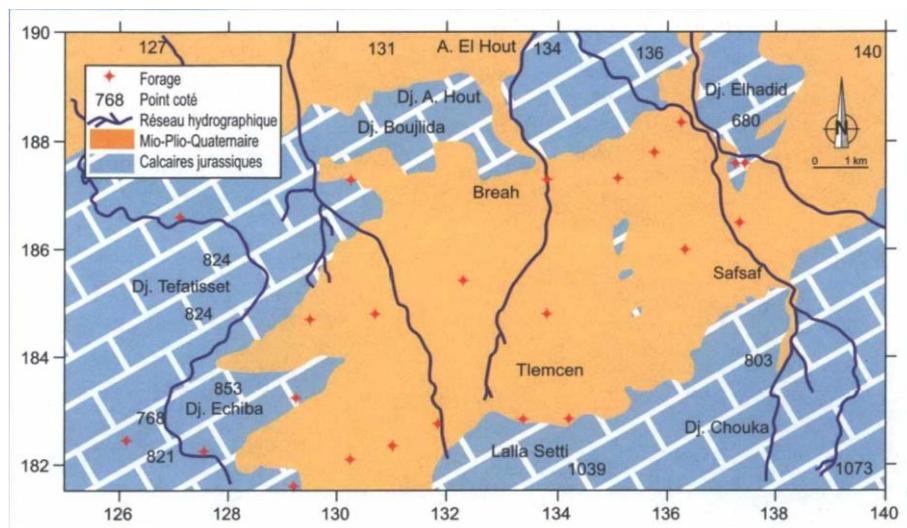


Figure II.4 : carte géologique simplifiée de la région de Tlemcen. Les limites d'affleurements sont reprises à partir de la carte géologique de F. Doumergue, Feuille Tlemcen au 1/50000, 1926.

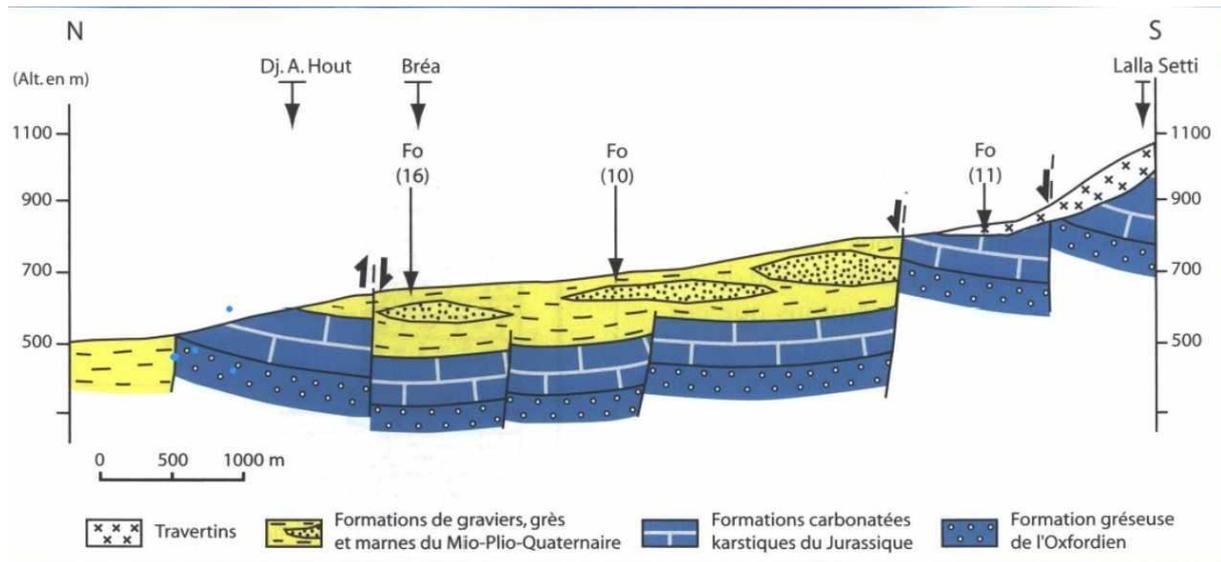


Figure II.5 : Coupe géologique simplifiée de la région de Tlemcen [d'après Collignon, 1986 et Achachi, 1996, modifié] [In Bensaoula. F, 2007]

Les formes de surface sont surtout représentées par des lapiés. Leur profondeur varie de quelques millimètres à plus d'une dizaine de centimètres. Ils se développent plus dans les calcaires que dans les dolomies. Ils sont profonds dans les calcaires purs.

L'intensité de la dolomitisation est liée avant tout à la fracturation [Benest, 1985] [In Bensaoula. F, 2007]. Les dolomies de Tlemcen ou membre inférieur, sont très grossièrement cristallisées et parfois friables. Par conséquent, elles produisent du sable dolomitique dont l'abondance permet l'exploitation en carrière comme dans les régions de Sidi Senouci, Mansourah, Ouchba, Saadnia et Ouled Mimoun.

Ainsi, sur les affleurements dolomitiques, la pluie s'infiltré directement à travers les pores de la roche et s'écoule moins qu'elle ne le ferait sur des calcaires compacts. Ces conditions sont moins favorables à la formation des lapiés. Il se forme très souvent des reliefs ruiniformes (photo 1).



Photo 1 : La dissolution partielle rend les dolomies vacuolaires et leur donne un aspect ruiniforme.



Photo 2 : Versant d'abondantes constitué de dolomies de Tlemcen. D'innombrables petits avens se sont formés. Parfois on peut voir des arbres qui y ont pris racine grâce à l'existence d'un matériau meuble retenant l'eau.

Les dolines sont très fréquentes. On y rencontre des formes circulaires, d'autres à forme elliptique. On les trouve surtout dans la vallée d'oued Nchef, dans le plateau de Sidi Senouci, dans le Djebel Oum El Allou. Elles sont souvent comblées de terra rossa. La suffusion est très présente (photo 2).

L'une des formes karstiques les plus remarquables est le poljé de Terni qui s'étend sur une superficie de plus de 50 km². La planitude du fond de ce poljé est remarquable. Elle résulte,

en grande partie, de la présence d'un colmatage détritique qui peut atteindre plusieurs dizaines de mètres d'épaisseur, constitué par des résidus de décalcification, des arènes dolomitiques, des alluvions et des dépôts lacustres ainsi que des marnes miocènes. Les versants périphériques entaillés dans les formations carbonatées des membres inférieur et supérieur, sont sillonnés de lapiés vacuolaires et d'avens (photo 3).

Les avens sont nombreux sur le karst des Monts de Tlemcen. On peut les observer sur le plateau de Lalla Setti, dans le plateau de Terni, sur le Djebel Oum El Allou [Bensaoula, 2004], sur le Djebel Fernane Achour et plus à l'est dans la région d'Ouled Mimoun [Bensaoula, 1992, 2006] [In Bensaoula. F, 2007]



Photo 3 : Poljé de Terni vu à partir du sud. En premier plan, nous observons les marnocalcaires de Raourai, en dernier plan les dolomies de Terni.

2. 2 Les aspects de la karstification profonde :

Les cavités de grande taille sont facilement décelables puisque accessibles, visitables et organisés en réseaux spéléologiques. Ils ont été mis en évidence par les travaux de Birebent [1948] et Collignon [1983] [In Bensaoula. F, 2007]. Les cavités les plus intéressantes sont des rivières souterraines de Ghar Bou Maaza (18600 m), Ghar el Kahal (2210 m) ou Bir Khaddous (570 m).

Il existe d'autres cavités moins importantes, notamment celles de Tagma et d'Ain Fezza dans le nord-est.

3. Karsts des Monts de Tlemcen :

3.1 Pluviométrie :

Les Monts de Tlemcen constituent l'une des régions les plus arrosées de l'ouest de l'Algérie, ce qui leur vaut de jouer le rôle de château d'eau naturel pour une bonne partie des villes de la région [Collignon, 1986].

En Algérie, plusieurs cartes en courbes isohyète portant sur de longues périodes, ont été publiées : 1913-1938 [Seltzer, 1946], 1913-1963 [Chaumont et Paquin, 1971] et 1922-1989 [Laborde, 1993]. Ce dernier auteur a étudié 120 stations pluviométriques du nord algérien. Selon lui, le régime pluviométrique annuel est caractérisé par quatre phases : deux phases excédentaires au cours de périodes 1922-1938 et 1947-1972 alternées de phases déficitaires. À partir de l'année 1973, une longue période de sécheresse s'est affirmée. [Laborde, 1993] [In Bensaoula. F, 2022]

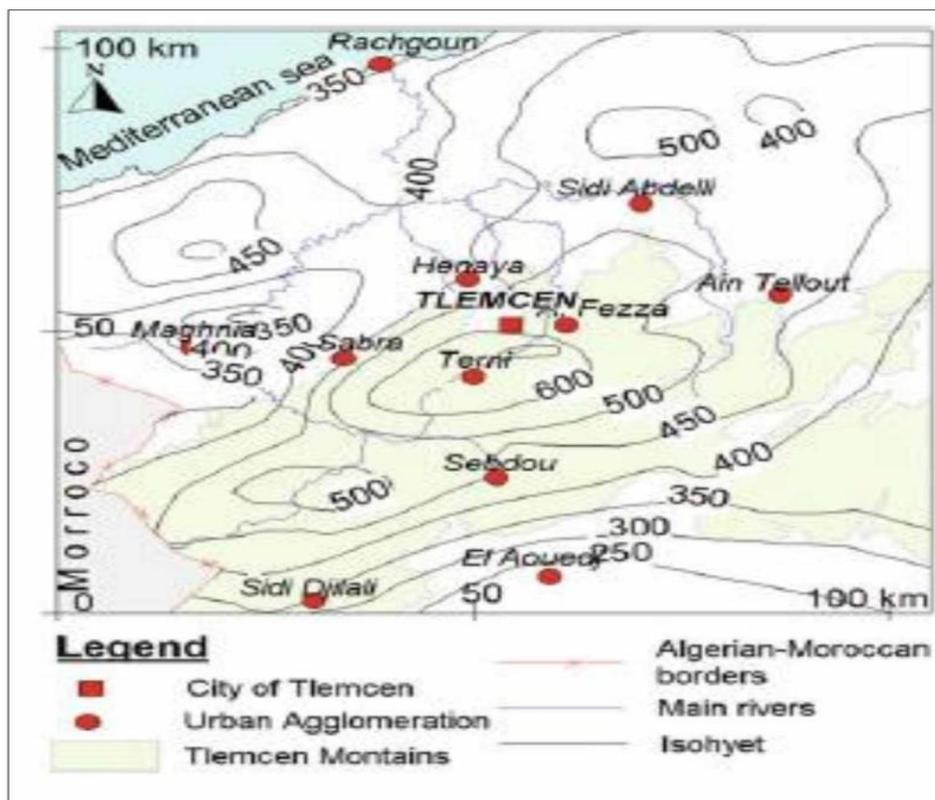


Figure II.6 : carte de la pluviométrie moyenne annuelle dans l'Ouest algérien (Laborde, modifié) [In Bensaoula. F, 2007]

3. 2 Les formes karstiques inventoriées :

Étonnamment, les formes karstiques de surface sont moins développées dans les monts de Tlemcen. Tandis que le calcaire et la dolomite constituent la majorité des affleurements Rocheux. Le Lapiaz est peu développé voire totalement absent de certains rochers. Ceci est une conséquence d'un processus très répandu et ancien de dolomitisation, conduisant à la formation de dolomies à gros cristaux (souvent décrits comme saccharoïdes), dont l'altération produit des sables dolomites grossiers et effacés, des formes karstiques de surface propres.

Le travail d'exploration continue et cet inventaire devra certainement être mis à jour dans le futur. La démarche adoptée dans l'élaboration de ce dernier inventaire passe par plusieurs étapes :

- Collecte de données sur les quelques éléments karstiques inventoriés dans la documentation existante : thèses, rapports de spéléologues etc.
- Identification sur support cartographique des zones d'affleurement calcaires et dolomitiques susceptibles d'abriter des formes karstiques
- Relevé systématique des quelques formes karstiques (cavités, aven etc.) répertoriées sur les anciennes cartes géologiques de la région notamment celles à l'échelle 1/50000.
- Enfin un repérage (et exploration quand c'est possible) sur le terrain des cavités est effectué avec l'aide indispensable des habitants autochtones.

Les formes karstiques sont classées en cinq catégories

*Les grottes sont des cavités de grandes dimensions (de plusieurs dizaines de mètres) composées de plusieurs salles de hauteur de plafond de plusieurs mètres. Elles se situent très souvent sur le flanc des versants avec des ouvertures béantes ou parfois très discrètes les rendant difficiles à trouver. Il est vrai que seule la Grotte de BeniAdd, appelée aussi grotte de Yebdar (3), de grande renommée nationale grâce à ses concrétions spectaculaires, est accessible au public.

Cependant d'autres grottes non moins intéressantes ont été inventoriées à travers les monts de Tlemcen. Nous citons, Ghar Eddaghra (9), Ghar Lahmam (50), Ghar El Makam (13), Ghar

Oudjbar (2) et d'autres, qui comportent de belles concrétions mais malheureusement sont difficiles d'accès au public.

*Les gouffres sont des cavités accessibles par des puits naturels d'un diamètre pouvant évoluer sur plusieurs mètres. De nombreux gouffres ont été explorés dans la zone du système karstique de Ghar Boumaza. Ils sont profonds de quelques dizaines de mètres pour atteindre jusqu'à la centaine de mètres. Nous citons le gouffre d'Ain Oraf (24), Bir Saddoug (41), Ghar Lehman (8). Certains aboutissent sur des grandes salles avec des concrétions, du type draperies, observables sur les parois. On peut les observer aussi sur le plateau de Lalla Setti, sur le Dj. Oum El Allou, Dj Fernane Achour et plus à l'Est dans la région d'Ouled Mimoun [Bensaoula 2006, Bensaoula et al. 2019].

* Les avens correspondent à des ouvertures observées sur les affleurements calcaires et dolomitiques, très souvent à ras le sol, probablement des lapiaz qui se sont développés sous l'effet de la dissolution. Rares sont ceux qui sont non visitables. Ces avens présentent pour la plupart une ouverture de 2 à 3m et permettent l'exploration à la corde qui parfois s'avère très difficile.

*Les cavités avec des rivières souterraines : alors que le karst de surface est peu impressionnant, les Monts de Tlemcen recèlent des rivières souterraines très étendues dont Ghar Boumaza qui est la plus longue explorée en Afrique à ce jour (18,4 km) [Birebent, 1948 et 1953, Benoit et al., 1985, 1988a, 1988b – Collignon, 1987 et 1991] [In Bensaoula. F, 2022], Rhar Lakhel qui s'étend sur 2210 m (Benoit, 1985), et Ain Bir Tessa qui s'étend sur 1805m. [Benoit et al.,1990] [In Bensaoula. F, 2022]

* Les estavelles et pertes ont été identifiées par les habitants autochtones qui les utilisent pour l'approvisionnement en eau de leur cheptel bovin et ovin. Ce sont de petites cavités qui se comportent comme des pertes drainant les eaux de ruissellement en période de pluie et dès que le niveau d'eau atteint une certaine cote elles se comportent comme des sources. Jusqu'à ce jour, aucune perte concentrée spectaculaire n'a été signalée ou inventoriée. Il y a certainement des pertes temporaires dans le lit des cours d'eau temporaire. Une seule petite perte est signalée par les villageois lors des prospections de terrain à proximité du village Tal Terni, ainsi qu'une perte/ résurgence sur le flanc Sud du Djebel Nador .Ceci est à mettre en relation avec l'oblitération des formes karstiques par le sable dolomitique (qui favorise l'infiltration diffuse au détriment de l'infiltration concentrée).

* Le karst profond : le large développement du karst souterrain est par ailleurs confirmé par les résultats des travaux de forage, qui ont recoupé de nombreuses cavités souterraines. En effet, les forages constituent un excellent outil d'observation du karst et en particulier de sa partie noyée [Bensaoula, 2007]. Quand ils sont réalisés par le système de rotation, ces forages permettent d'enregistrer des pertes de boue qui constituent un excellent indicateur des niveaux fissurés voire karstifiés. L'étude menée sur ces pertes de boues a permis de voir que les calcaires sont plus favorables à la formation des cavités [Bensaoula, 2007] et aussi que les cavités karstiques pouvaient être rencontrées même à de grandes profondeurs (619m au forage SAL à Zouia dans les calcaires du Lias) [Bensaoula, 2007], [Collignon, 1986].

* Les massifs de travertins se sont développés le long des escarpements. Ils constituent une des spécificités du paysage des Monts de Tlemcen. Ces massifs constituent de puissants dépôts (50 Mm³ à Lalla Setti, 15 Mm³ à Ouchba) présents en masse et s'avancent en hautes falaises à pic (60 m d'épaisseur selon [Doumergue, 1926], ils sont d'un aspect souvent très vacuolaire voire caverneux. Plus d'une trentaine d'affleurements de travertins, ont été inventoriés. D'une étendue parfois considérable, ils sont curieusement plus abondants dans la partie Ouest des Monts de Tlemcen que dans la partie Est [Bensaoula, 2006, Bensaoula et al. 2019]. Ces massifs de travertins montrent que des sources importantes ont existé à des altitudes supérieures au niveau de base actuel, avant de cesser de fonctionner. Ces sources rejetaient des eaux sursaturées en carbonate de calcium à la pCO₂ atmosphérique.

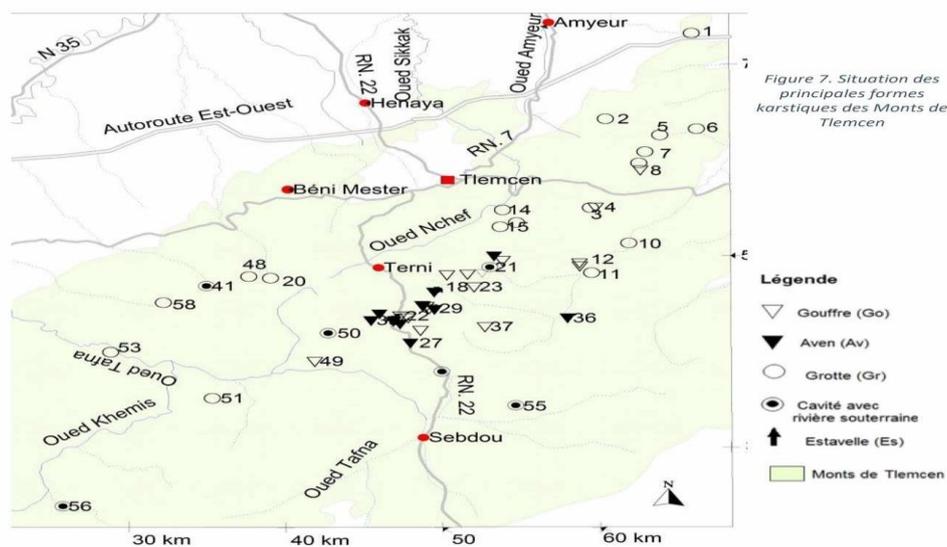


Figure 7. Situation des principales formes karstiques des Monts de Tlemcen

Figure II.7 : situation des principales formes karstiques des monts de Tlemcen

4. Hydrogéologie :

L'oued Tafna prend sa source au niveau d'Ain Taga. Son trop plein, après les gros orages, est évacué par Ghar Boumaza. Il s'engage dans une vallée encaissée dans les terrains du Jurassique et récupère sur son trajet Oued (rivière) Khemis, avant d'atteindre Sidi Medjahed, après lequel il coule à travers les formations du Néogène.

La partie centrale des Monts de Tlemcen est drainée par l'Oued Sikkak qui prend naissance sur le plateau de Terni par l'Oued Ennachef. Il récupère, à la sortie du fossé de Tlemcen, les quelques affluents qui drainent les reliefs voisins et se jette dans le cours principal de la Tafna avec l'Oued Zitoun et Oued el Atchane qui sont des affluents de rive gauche. La partie orientale des Monts de Tlemcen est d'abord drainée par Oued Lakhdar qui prend sa source dans les massif des bordures Sud et Est du plateau de Terni, ensuite il se jette dans l'Oued Isser au niveau de sa rive gauche en entaillant le plateau des Abdelllys. L'écoulement des eaux de surface est en grande partie, occasionnel et se fait uniquement au cours des courtes périodes pluvieuses.

Les résultats obtenus ont permis de préciser, d'une manière très intéressante, l'hydrogéologie des aquifères karstiques des Monts de Tlemcen. Ils ont permis de mettre en évidence les grandes potentialités hydrauliques des Monts de Tlemcen, en particulier pour la gestion stratégique des sécheresses pluriannuelles [Collignon et Bensaoula, 2019].

Les Monts de Tlemcen ne constituent pas une seule unité karstifiée drainée par un nombre de grandes sources (contrairement aux Monts de Saïda et aux Monts de Chellalah). Les nombreuses failles qui les divisent engendrent des compartiments déconnectés les uns des autres, contenant tout autant d'aquifères). Il est délimité une trentaine d'aquifères indépendants [Collignon, 86] de tailles très variées (de 4 à 300 km²).



Photo 4 : Résurgence de ghar boumaaza en crue [photo F.Bensaoula]

4. 1 Vulnérabilité à la pollution des eaux souterraines et pratique de la spéléologie :

Les aquifères karstiques des Monts de Tlemcen recèlent des eaux qui sont généralement de bonne qualité et qui sont captées par forage et assurent une grande part de l'approvisionnement en eau potable de la population de la région de Tlemcen.

De ce fait, la protection de cette eau s'avère plus que nécessaire. C'est dans la loi n°83-17 du 16 juillet 1983, portant code des eaux que la protection des ressources en eau fut pour la première fois imposée. En 2005, la loi relative à l'eau consacre tout un chapitre à la protection et la préservation des ressources en eau en instaurant deux types de périmètres à savoir les périmètres de protection qualitative et quantitative. Un des outils nécessaires à cette démarche c'est la cartographie de la vulnérabilité à la pollution des eaux souterraines qui nécessite une connaissance assez poussée du milieu physique. Un inventaire détaillé des formes karstiques qui rendent le milieu aquifère des Monts de Tlemcen plus vulnérable à la pollution, est indispensable. En revanche la fréquentation par les spéléologues des rivières souterraines peut porter atteinte à la qualité d'eaux souterraines qui sont exploitées pour la distribution d'eau potable. Il convient donc d'être très vigilant lors d'exploration des rivières souterraines afin de ne pas polluer l'eau.

4.2 L'importance des eaux karstiques dans l'approvisionnement en eau de la population de Tlemcen :

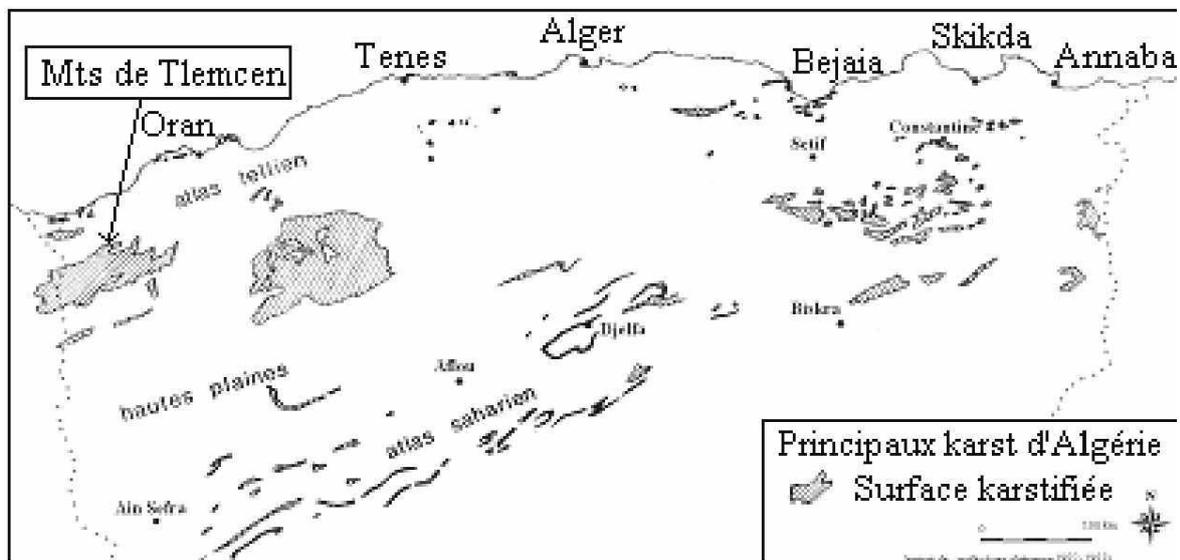


Figure II.8 : Les principaux Karst d'Algérie [Collignon, 1991]

La wilaya de Tlemcen s'étend sur une surface de plus de 9017 km². Elle occupe 4% de la superficie totale du territoire national (Figure II.8). Sa population représente 2,88 % de la population nationale au recensement de 1998. En 2000, sa population a été estimée à 866.000 habitants [ANAT, 1994].

Les eaux karstiques participent pour une large part à l'alimentation en eau potable ainsi qu'aux besoins industriels et agricoles dans la région de Tlemcen. Un titre d'exemple, l'état de l'approvisionnement en eau potable du groupement urbain de Tlemcen, sachant qu'il inclut les trois daïras : Tlemcen, Chetouane et Mansourah. L'approvisionnement en eau de ce groupement se fait à partir du barrage du Meffrouch ainsi qu'à partir de forages captant les eaux des Dolomies de Tlemcen. Il faut noter que l'apport des eaux karstiques mobilisées par forages fournit en moyenne la moitié du volume d'eau produit. Les volumes d'eau soutirés du barrage enregistrent un maximum en janvier et un minimum en septembre. Ceci est équilibré par l'apport des eaux de forages.

Les eaux karstiques des dolomies de Tlemcen sont mobilisées par des forages de moyenne profondeur allant de 130 à 400 mètres. Ils ont été inventoriés environ une trentaine dans le groupement urbain de Tlemcen.

Les seules prospections effectuées avant 1970 sont celles du barrage Meffrouch et une profonde reconnaissance dans la région de BeniBahdel. Les prospections ont ensuite touché les piémonts sud des monts de Tlemcen où les ressources en eau ont toujours été faibles [Bensaoula et al. 2003]. Dès les années 80, le développement industriel ainsi que la démographie de la région de Tlemcen ont poussé les autorités locales à multiplier les prospections par forages pour mobiliser une ressource en eau plus grande. Ceci explique la montée en flèche du nombre de mètres linéaires forés entre 1980 et 2000. La situation devient alors plus stable car les débits mobilisés sont assez suffisants pour subvenir aux besoins de la population.

Période de réalisation	Nombre de forages	Linéaire foré (m)	Zone prospectée
Avant 1970	20	1644,6	Meffrouch
1970 – 1980	12	1811	Terny, El gor, El Aricha
1980 – 1990	53	12.642,75	Tlemcen, Sebdou
1990 – 2000	51	11.620	Tlemcen, Sebdou
2000 – 2004	22	7715	Zone frontalière
Total	158	35.433,35	Monts de Tlemcen

Tableau II 1 : Etat des réalisations de forages à travers les monts de Tlemcen [Bensaoula et al. 2003].

4. 3 Les forages récents dans les aquifères karstiques des monts de Tlemcen :

L'Ouest algérien a connu ces deux dernières décennies une baisse de la pluviométrie. Ce déficit pluviométrique a engendré une sécheresse prolongée et grave. Le tarissement de certaines sources qui alimentaient la population de Tlemcen et la faible recharge des deux seuls grands barrages existant à l'époque dans la région, dont le barrage des BeniBahdel et celui du Meffrouch, a amené les autorités locales à lancer des prospections des eaux souterraines à travers les monts de Tlemcen. Ces derniers ont toujours constitué l'une des régions les plus arrosées de l'ouest de l'Algérie. L'exploitation des réservoirs souterrains mis en évidence dans les monts de Tlemcen, a commencé d'une manière intense dès l'année 1984 avec des programmes de forages toujours réalisés en urgence. Il ya plus de 100 forages hydrauliques réalisés dans différents programmes par l'ANRH (Agence Nationale des Ressources Hydrauliques) et la DHWT (Direction de l'Hydraulique de la Wilaya de Tlemcen).

4. 4 Forages hydrauliques et nature des formations traversées et formations carbonatées

Les données ont été utilisées de plus de 100 forages visant les formations du Jurassique supérieur et réalisés dans le cadre de la prospection menée par les services de l'ANRH et de la DHW de Tlemcen. Les coupes, observées dans ces ouvrages, sont interprétées selon les travaux cartographiques de Doumergue [1926], Auclair et Biehler [1965], Benest [1985], Collignon [1986], Bensaoula [1992], Benest et al [1999]. Généralement, les eaux mobilisées par ces ouvrages sont destinées à l'alimentation en eau potable de la population. Dans la figure II.9, il apparaît que les forages se répartissent surtout sur les bordures nord des monts de Tlemcen et où les agglomérations sont les plus peuplées de la région. Aussi, les conditions hydrogéologiques pour ce type de captages d'eaux souterraines sont favorables. Sur la figure II.9, Les forages des piedmonts nord des monts de Tlemcen qui sont au nombre de 78 (réalisés dans la période 1980-2000). Précisons que lors des implantations de ces forages, les deux formations calcaréo-dolomitiques de Tlemcen et de Terni sont visées. Les linéaires forés pour les forages s'élèvent à plus de 17 km dont 49% seulement ont concerné les formations aquifères recherchées.

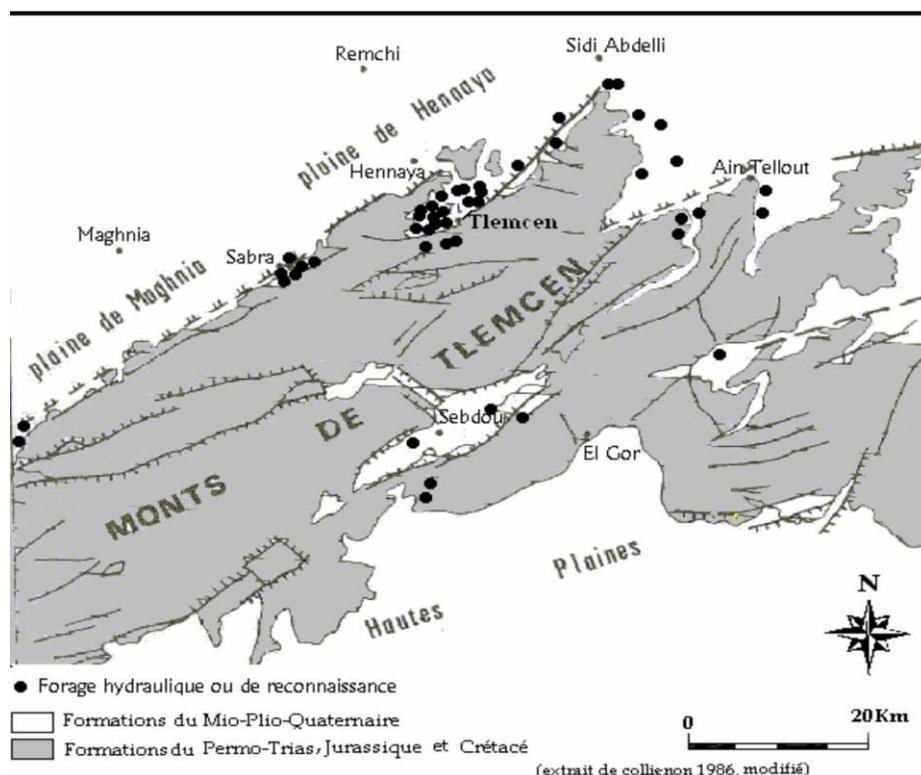


Figure II.9 : Plan de situation des forages à travers les monts de Tlemcen

Les deux séries calcaréo-dolomitiques constituent sans conteste les meilleurs aquifères potentiels dans les monts de Tlemcen. L'important nombre des forages réalisés permet de confirmer les observations de Collignon [1986] tout au début de ses prospections, il y'a de cela près d'une vingtaine d'années. En effet les indices de karstification en profondeur sont surtout des fissures ou des cavités qui se traduisent par des pertes de boue de forages, totales ou partielles, au cours des travaux de réalisation ou alors par des chutes libres d'outils. Le niveau dolomitique inférieur ou dolomies de Tlemcen est dans les trois situations celui qui présente le plus d'indices de karstification.

5. Conclusion :

Les eaux souterraines karstiques jouent un rôle très important dans l'approvisionnement en eau de la population de Tlemcen. C'est une ressource qui a tendance à être de plus en plus exploitée. Il est impératif d'œuvrer pour une protection de cette ressource tant du point de vue de la qualité que du point de vue de la quantité. Pour cela, la mise en place de périmètres de protection à cette ressource, si importante dans le développement socio-économique de la région, s'avère indispensable.

Le karst des Monts de Tlemcen présente toutes les caractéristiques d'un karst évolué avec des cavités souterraines à maintes reprises mises en évidence par les travaux de forages. Les résultats qui obtenus dans l'étude de la karstification, permettent de voir que les formes de karstification interne se situent près de la surface ou près du toit des formations karstiques sous couverture, sans pour autant qu'elles deviennent rares ou inexistantes en profondeur.

CHAPITRE III

Les Méthodes de prospection géophysique

1. Introduction :

Les méthodes de prospection géophysique visent à caractériser l'évolution de certains paramètres physiques du sous-sol afin d'obtenir des informations géologiques sur sa composition et ses propriétés. Bien que plusieurs études aient montré l'intérêt d'appliquer la géophysique aux structures karstiques, ces méthodes n'ont pas encore été systématiquement appliquées dans les études hydrogéologiques.

2. L'hydrogéophysique :

2.1 Apports de l'hydrogéophysique en milieu karstique :

La géophysique est une discipline qui consiste à étudier les propriétés physiques du sous-sol de manière non destructive. Les différentes techniques sont liées à la mise en œuvre de la mesure tandis que les méthodes sont liées au principe physique exploité.

Ainsi :

- La tomographie des résistivités électriques ou "Electrical Resistivity Tomography" (ERT), les sondages et les traînées électriques étudient la résistivité électrique du sous-sol.
- La technique de la Polarisation Spontanée (PS) consiste à étudier les potentiels électriques naturels qui se propagent dans le sous-sol.
- Les techniques électromagnétiques (EM) fréquentielles comme le Slingram ou le "Very Low Frequency" (VLF) utilisent le phénomène d'induction généré par un champ magnétique pour déterminer la conductivité électrique du sous-sol.
- La méthode sismique est basée sur l'étude de la propagation des ondes sismiques.
- La technique du géoradar ou "Ground Penetrating Radar" (GPR) utilise la vitesse de propagation des ondes électromagnétiques et leur réflexion sur les interfaces géologiques.
- La gravimétrie consiste à étudier les variations du champ de pesanteur terrestre.
- La Résonance Magnétique des Protons (RMP) est la seule méthode à fournir un signal qui peut être directement relié à la teneur en eau.

L'hydrogéophysique implique l'étude des changements spatiaux ou temporels de ces différentes propriétés physiques pour évaluer les réservoirs ou comprendre la dynamique

de l'eau. Ces investigations peuvent nécessiter des volumes allant d'échantillons de roche à des parties de l'aquifère. Le karst constitue un système hydrologique complexe où différentes techniques géophysiques sont mises à l'épreuve tant lors de la phase d'acquisition des données que lors de leur traitement et de leur interprétation. Donc on peut dire que, l'utilisation d'une seule technique géophysique peut conduire à des interprétations risquées, d'où l'intérêt de **combiner plusieurs techniques**. Cela permet de formuler des hypothèses plus solides.

Dans les premiers temps de l'hydrogéophysique du karst, les travaux se sont concentrés sur la détection des différents objets géologiques tels que l'épikarst, les stratifications, les cavités "vides", les cavités noyées, les limites de l'aquifère, les dolines, les fractures ou les failles. Cette phase était indispensable pour comprendre les atouts et les limites de chaque technique géophysique en contexte karstique.

Le tableau suivant illustre les principales méthodes et techniques géophysiques habituellement appliquées à l'hydrogéologie ainsi que leurs paramètres physiques et l'influence de l'eau souterraine.

Méthode géophysique	Technique de mesure	Paramètre géophysique mesuré	Propriété physique opérationnelle	Influence de l'eau souterraine
Electrique	Trainé	Différence de potentiel Due aux courants de conduction	Résistivité électrique	oui
	Sondage			
	Panneau			
	Polarisation spontanée	Potentiel électrique naturel	Conductivité électrique Différence de pression	oui
Électromagnétisme	VLF (monde inclinaison et résistivité)	Signal électromagnétique du à l'induction	Conductivité électrique (susceptibilité magnétique et permittivité)	oui
	Slingram			
	TDEM			
	Radar	Temps de propagation des électromagnétiques	Permittivité diélectrique (susceptibilité magnétique et résistivité électrique)	Secondaire
Sismique	Profil Sismique	Temps de propagation des ondes acoustiques	Densité et module d'élasticité	Secondaire
	Profil ou carte du champ de la pesanteur	champ de la pesanteur		Secondaire

Micro gravimétrie	Surface to depth	Variation temporelle du champ de pesanteur	Densité	Oui	
Magnétisme	Profil ou carte du champ magnétique terrestre ou d un gradient de ce champ	Champ géomagnétique	Susceptibilité magnétique	Non	
Résonance magnétique des protons	Sondage	Signal RMP	Signal émis par les noyaux atomiques de la molécule d eau	Oui	
Radon	Carte des concentrations	Concentration en radon	Radioactivité naturelle	Secondaire	

Tableau III.1 : Méthodes et techniques géophysiques usuelles de surface pour l'hydrogéologie [d'après Kearey et Brooks, 1984 ; Vouillamoz, 2003 ; Chalikakis, 2006] [In Simon. D, 2014]

3. Les méthodes de prospection :

3.1 Méthodes géophysiques et techniques de mesures :

Les quatre principaux paramètres physiques sont la résistivité électrique, la densité, la vitesse de propagation des ondes élastiques et la susceptibilité magnétique.

Chacun de ces paramètres détermine une méthode fondamentale de prospection géophysique : électrique, gravimétrique, sismique et magnétique.

Le nombre de méthodes est donc restreint, mais les techniques de mesures sont nombreuses et utilisent parfois conjointement deux méthodes. Ainsi, on peut encore élargir les méthodes en ajoutant la méthode électromagnétique.

Il faut distinguer de ces méthodes géophysiques dites « traditionnelles », la RMP qui mesure un signal émis par des noyaux atomiques de la molécule d'eau.

Dans le cadre d'applications hydrogéologiques, cette propriété de sélectivité sur la molécule d'eau conduit à qualifier la RMP de méthode géophysique directe. [Vouillamoz, 2003] [In Simon. D, 2014]

En employant les diverses techniques géophysiques, le géophysicien cherche à mettre en évidence des contrastes, ou anomalies, qui lui permettent d'imaginer les structures (modèles) susceptibles de produire les variations mesurées.

Mais la solution n'est pas unique, car plusieurs modèles peuvent reproduire les mêmes valeurs du paramètre enregistré.

Pour dépasser cette ambiguïté, il utilise des connaissances géologiques et hydrogéologiques et mesure plusieurs grandeurs physiques, utilisant diverses méthodes, lui permettant ainsi de réduire l'indétermination. [Vouillamoz, 2003] [In Simon. D, 2014]

3.2 Méthodes hydrogéologiques :

Les études hydrogéologiques permettront :

- l'évaluation de la ressource sur le plan quantitatif ;
- l'identification du circuit de l'eau et les réservoirs potentiels.

Les moyens utilisés sont :

- les relevés piézométriques ;
- les suivis des débits des sources ;
- les mesures des paramètres hydrodynamiques ;
- l'étude des écoulements de surface, ...

3. 3 Choix des méthodes :

Pour l'hydrogéologue, les méthodes géophysiques sont des outils susceptibles de répondre à des questions relatives aux eaux souterraines [Guérin, 2005]. Mais pour que les méthodes géophysiques puissent apporter un maximum d'informations, il faut :

- Objectifs de l'étude : définir clairement les objectifs, tels que la localisation de l'aquifère, la détection de failles, etc.
- Nature du karst : comprendre la géologie spécifique du karst dans votre région, car cela influencera la sélection des méthodes. Les caractéristiques du karst varient considérablement d'une zone à l'autre.
- Profondeur : la profondeur à laquelle vous souhaitez étudier le karst influencera le choix des méthodes. Certaines méthodes sont adaptées aux études en surface, tandis que d'autres peuvent pénétrer plus en profondeur.
- Accessibilité : considérez la facilité d'accès à la zone d'étude. Certaines méthodes géophysiques nécessitent des équipements lourds et peuvent ne pas être praticables dans des endroits difficiles d'accès.
- Ressources disponibles : tenez compte de votre budget, du temps disponible et des ressources humaines pour choisir des méthodes réalisables.
- Historique des études : si des études géophysiques précédentes ont été réalisées dans la région, consultez-les pour orienter votre choix.

En fonction de ces facteurs, on peut envisager des méthodes telles que la sismique, le géoradar etc. Ou même des techniques plus spécifiques au karst comme la méthode de la résistivité électrique caverneuse. Il est important d'adapter nos choix en fonction des circonstances spécifiques de notre étude de karst.

4. Prospection géophysique appliquée à l'hydrogéologie – hydrogéophysique :

Les méthodes géophysiques mesurent les variations spatiales et temporelles des propriétés physiques du sous-sol [Kearey and Brooks, 1984]. En fait, le géophysicien mesure certains paramètres physiques du sous-sol afin d'en obtenir une image qu'il essaie ensuite de traduire en terme géologique. Quand la prospection géophysique vise à définir des paramètres qui sont en liaison directe ou indirecte avec les ressources en eau souterraine, il s'agit de l'hydrogéophysique [Guérin, 2004].

4.1 Méthode sismique :

La méthode sismique est une technique utilisée pour étudier la structure de la terre en utilisant des ondes sismiques. Elle repose sur la génération d'ondes sismiques artificielles, généralement par des explosions contrôlées ou des frappes au sol, qui se propagent à travers le sous-sol. Ces ondes se réfléchissent et se réfractent à différentes interfaces entre les couches de la terre, et les enregistrements des temps de propagation de ces ondes permettent de créer des images de la structure interne de la terre. Cette méthode est largement utilisée en géologie, en géophysique et dans l'exploitation pétrolière pour cartographier les couches géologique, localiser des réservoirs d'hydrocarbures, détecter des failles et bien d'autres applications.

Les ondes sismiques sont principalement de deux types :

- les ondes de volume
- ondes de compression P ou ondes longitudinales ou ondes primaires
- ondes de cisaillement S ou ondes transversales ou ondes secondaires
- les ondes de surface ou ondes guidées
- ondes de Rayleigh
- ondes de Love

En recherche pétrolière il s'agit essentiellement de sismique réflexion alors que dans les travaux relevant de la géologie de l'ingénieur (hydrogéologie, construction de routes, barrages, tunnels,...), il s'agit le plus souvent de sismique réfraction. Pour l'étude détaillée de la partie superficielle du sous-sol il est impératif de s'intéresser à l'enregistrement, le traitement et l'inversion de toutes les ondes P : directes, réfractées, réfléchies et diffractées. Cela prend la forme de la tomographie des ondes P, qui permet de bien définir le champ des vitesses. Ceci a deux applications :

a) la cartographie d'une géologie complexe qui ne peut pas être obtenue par la technique de réfraction.

b) un meilleur traitement de la sismique réflexion.

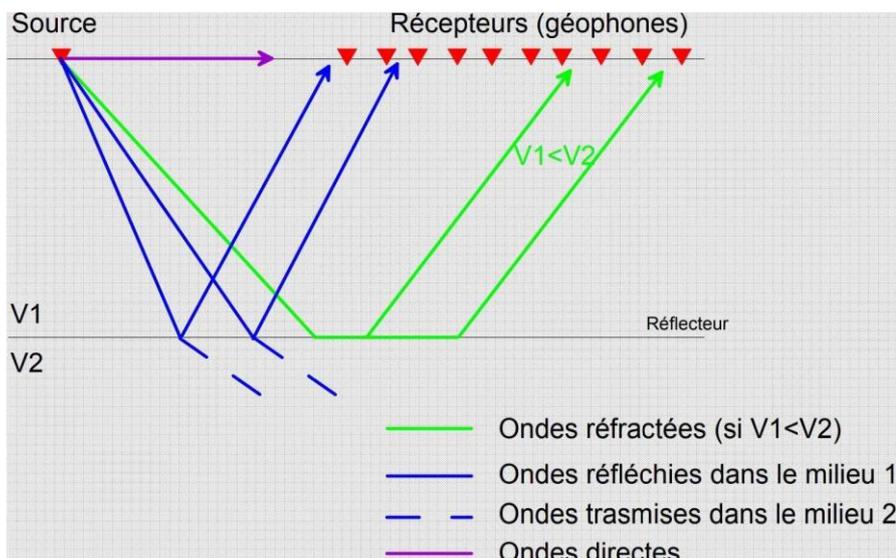


Figure III.1 : Principe de la méthode sismique

4. 1. 1 Matériel utilisé :

La méthode sismique utilise divers équipements pour étudier les caractéristiques géologiques subsurfaces de la terre en mesurant les ondes sismiques. Voici quelques-uns des principaux équipements et instruments utilisés :

- Géophones : ce sont des capteurs sensibles aux mouvements du sol qui enregistrent les ondes sismiques.
- Source sismique : il s'agit d'un générateur d'ondes sismiques, comme des explosifs, des marteaux vibrants, ou des poids tombant, utilisé pour produire des ondes sismiques contrôlées.
- Câbles de données : des câbles sont utilisés pour connecter les géophones aux équipements d'enregistrement et de traitement des données.
- Enregistreurs sismiques : ces appareils enregistrent les signaux sismiques captés par les géophones.
- Ordinateurs et logiciels : les données sismiques sont traitées et analysées à l'aide d'ordinateurs et de logiciels spécialisés pour créer des images de la subsurface.
- Equipement de terrain : cela peut inclure des outils pour creuser des trous pour les géophones, des instruments de mesure de la profondeur, et d'autres équipements nécessaires pour l'installation sur le terrain.

La combinaison de ces équipements permet aux géophysiciens d'obtenir des informations sur la structure géologique sous la surface de la terre.

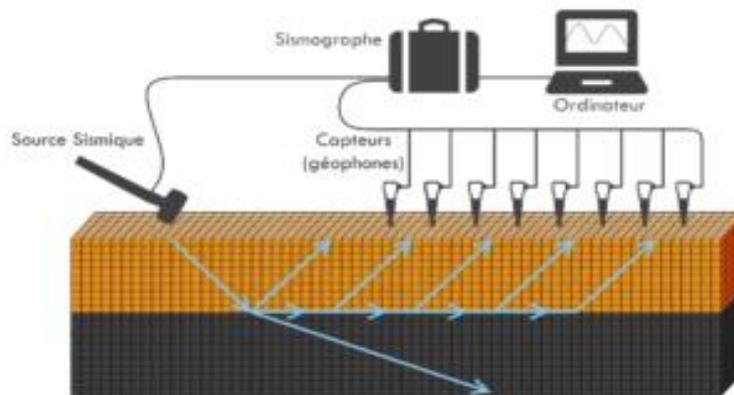


Figure III.2 : la sismique réfraction

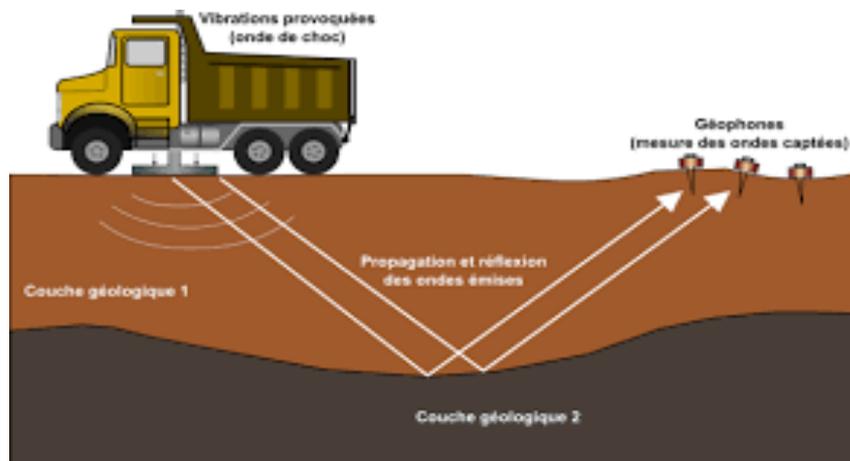


Figure III. 3: Le principe de la sismique

4. 1. 2 Stratégie de mesures :

Voici les étapes clés de la stratégie de mesure de la méthode sismique :

- Planification de l'étude : avant de commencer, il est essentiel de définir les objectifs de l'étude, de sélectionner la zone d'intérêt et de déterminer la profondeur cible à étudier.
- Sélection des équipements : choisissez les équipements appropriés, notamment les sismographes pour enregistrer les données sismiques, les sources d'ondes sismiques, et les capteurs géophones ou hydrophones pour détecter les ondes.
- Configuration du réseau de capteurs : placez les capteurs de manière appropriée sur le terrain en fonction de l'objectif de l'étude.

- Acquisition des données : générez des ondes sismiques en utilisant la source, puis enregistrez les données captées par les capteurs.
- Traitement des données brutes : traitez les données brutes pour éliminer le bruit de fond, corriger les erreurs et convertir les temps d'arrivée en informations sur la structure sous-surface.
- Analyse des données : interprétez les données traitées pour identifier les couches géologiques, les discontinuités et d'autres caractéristiques de la subsurface.
- Modélisation et interprétation : utilisez des logiciels de modélisation pour créer des modèles géophysiques basés sur les données collectées.
- Rapport et conclusions : présentez les résultats de l'étude dans un rapport détaillé, en expliquant les conclusions et en fournissant des recommandations, le cas échéant.
- Suivi et vérification : il est souvent nécessaire de vérifier les résultats de l'étude par d'autres méthodes géophysiques ou de forage pour valider les conclusions.
- Sécurité : assurez-vous de suivre les protocoles de sécurité appropriés lors de l'utilisation d'explosifs ou d'autres sources d'ondes sismiques.

Cette stratégie de mesure permet d'obtenir des informations précieuses sur la subsurface de la terre, utilisées dans divers domaines tels que l'exploration pétrolière, la recherche minière, la géotechnique et la sismologie.

4.2 Méthode Tomographie électrique :

4.2.1 Définition :

La prospection électrique est l'une des plus anciennes méthodes de prospection géophysique. Avec l'avènement des systèmes multi-électrodes de résistivité électrique et de logiciels commerciaux performants de modélisation directe et d'inversion en géophysique, la tomographie de résistivité électrique est un outil géophysique de plus en plus privilégié pour des applications en hydrogéologie. En effet, les différents types de dépôt quaternaires et de formations géologiques sont caractérisés par des plages de variations de résistivité électrique qui leur sont propres. La teneur en eau et la phase de l'eau dans ces dépôts affectent directement leur résistivité électrique. La connaissance de la stratigraphie locale ou l'accès à des informations de forages d'un site d'étude facilite l'interprétation des modèles de résistivité électrique obtenus de l'investigation des données de tomographies de résistivité électrique. La profondeur d'investigation d'une tomographie de résistivité électrique dépend du nombre

d'électrodes, du système employé, de la configuration des électrodes de la distance de séparation entre les électrodes.

4. 2. 2 Principe :

La résistivité électrique notée ρ en $\Omega \cdot m$ est l'inverse de la conductivité électrique σ en S.m. Elle exprime la capacité d'un matériau à s'opposer au passage d'un courant électrique. La résistivité électrique des roches est expliquée par trois types de conduction électrique :

- la conduction électrolytique, liée aux ions présents dans les fluides associés aux roches,
- la conduction électronique (métallique), liée à la présence de cristaux métalliques dans les roches,
- la conduction diélectrique caractérisant la propriété des semi-conducteurs à emmagasiner de l'énergie et à la restituer.

Ainsi, les principaux facteurs influençant la résistivité des roches carbonatées sont la teneur en eau et sa charge ionique. La température peut également influencer la résistivité de manière non négligeable car plus la température augmente plus les électrons sont mobiles ce qui induit une diminution de la résistivité du terrain. L'intensité du courant électrique pouvant circuler entre deux électrodes plantées dans le sol, varie en fonction de la différence de potentiel générée et de la résistance du terrain.

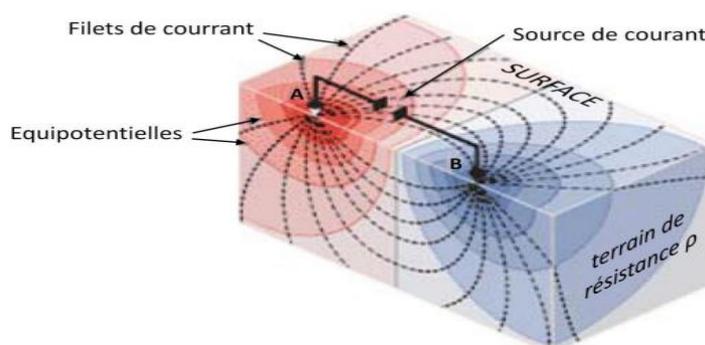


Figure III.4 : Distribution du courant créé par deux électrodes dans un sol homogène et isotrope [Astier, 1971, dans Chapelier, 2000]

La résistivité électrique de la roche est obtenue selon la relation suivante qui fait intervenir l'intensité du courant injecté (I en ampère : A), la différence de potentiel mesuré (ΔV en volt :

V) et le facteur géométrique (K) qui est propre à chaque mesure et dont le mode de calcul varie selon le protocole d'acquisition.

$$\rho = K * \frac{\Delta V}{I}$$

L'acquisition ERT consiste à injecter un courant entre deux électrodes (A et B) et à mesurer une différence de potentiel entre deux électrodes (M et N). Les points d'injection et de mesure sont successivement décalés latéralement et les mesures sont répétées avec des écartements différents de manière à détecter les variations de résistivité. Parmi de multiples dispositifs d'acquisition, trois ont été utilisés dans cette figure pour leur complémentarité (Fig. III.3) [Dahlin et Zhou, 2004] [In Simon. D, 2014] : le Wenner-Schlumberger (WS) qui est bien adapté pour la détection des structures horizontales et donne des mesures robustes, le Dipôle-Dipôle (DD) qui est mieux adapté pour la détection de structures verticales, le Gradient qui permet une acquisition plus robuste que le DD et plus rapide que les deux premiers protocoles. [Dahlin et Zhou, 2006] [In Simon. D, 2014]

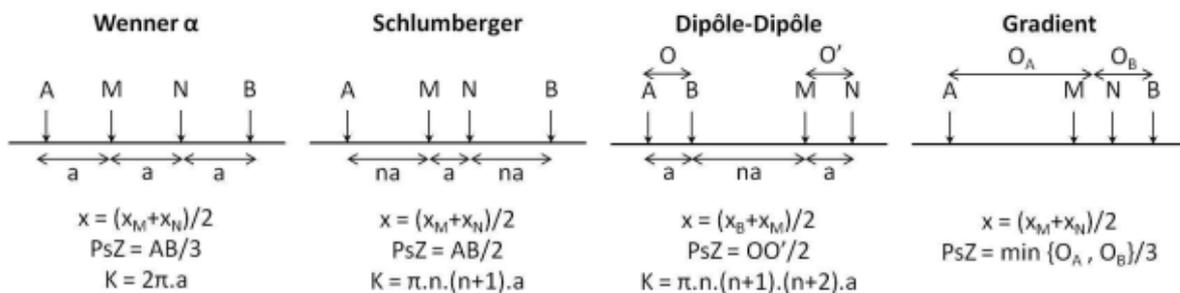


Figure III.5 : Dispositifs d'acquisition ERT utilisés et calculs associés, avec x le positionnement de la mesure le long du profil, PsZ la pseudo profondeur d'investigation et K le facteur géométrique.

4. 2. 3 Matériel utilisé :

Cette méthode utilise généralement les éléments suivants :

- Electrodes : des électrodes sont placées à la surface du sol ou dans le milieu à étudier.
- Générateur de courant : il fournit un courant électrique contrôlé qui est injecté à travers les électrodes d'injection dans le sol.

- Système de mesure : cela peut être un instrument de mesure capable de détecter la tension électrique entre les électrodes de mesure.
- Câbles de connexion : les câbles sont utilisés pour relier les électrodes au générateur de courant et au système de mesure.
- Logiciel de traitement des données : des logiciels spéciaux sont utilisés pour traiter les données recueillies et générer des images ou des modèles de résistivité électrique du sous-sol.
- Support de terrain : un support un trépied peut être utilisé pour maintenir les électrodes en place pendant la collecte de données.
- Equipement de terrain : cela peut inclure des dispositifs pour transporter l'équipement, des batteries, des équipements de sécurité, etc.

Un exemple de matériel utilisé pour l'acquisition est un résistivimètre ABEM Terameter SAS 4000 [Dahlin, 2001] [In Simon. D, 2014] avec 4 canaux d'acquisition et 64 électrodes.

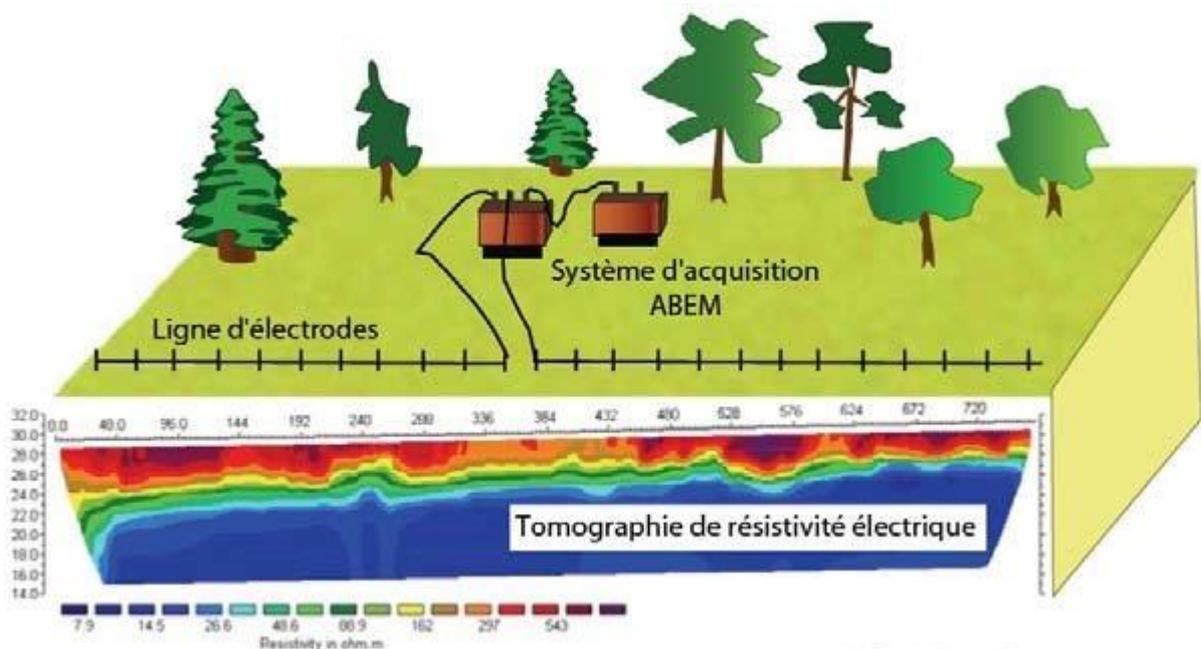


Figure III.6 : Dispositif de mesure de tomographie électrique

4. 2. 4 Stratégie de mesure ERT :

Voici les étapes générales de la stratégie de mesure de la tomographie électrique :

- préparation du terrain : avant de commencer les mesures, il faut préparer le terrain en installant des électrodes de manière appropriée.
- Injection du courant : un courant électrique est injecté dans le sol à travers deux électrodes, appelées électrodes d'injection.
- Mesure de la tension induite entre les autres électrodes, appelées électrodes de mesure, est enregistrée.
- Collecte de données : les mesures de tension sont enregistrées pour chaque combinaison d'électrode.
- Analyse des données : les données recueillies sont traitées pour calculer la résistivité électrique du sous-sol à chaque point de mesure.
- Création de modèles : les résistivités calculées sont utilisées pour créer des modèles de résistivité du sous-sol.
- Interprétation : les modèles de résistivité sont interprétés pour obtenir des informations sur la géologie, la présence d'eau souterraine, les structures géologiques, etc.
- Validation : les résultats obtenus sont généralement validés par d'autres méthodes géophysiques ou des données de forages géologiques pour confirmer leur précision.

Pour le suivi saisonnier, le positionnement des investigations ERT peut être fait selon la même stratégie.

4. 3 Gravimétrie :

4. 3. 1 Définition :

La gravimétrie est l'une des disciplines fondamentales de la géophysique. Elle consiste à mesurer, étudier et analyser les variations dans l'espace et dans le temps du champ de pesanteur de la Terre et des autres corps du système solaire. Elle est étroitement liée à la géodésie, qui a pour objet l'étude de la forme de la Terre, la mesure de ses dimensions et de ses déformations.

4. 3. 2 Principe :

Selon la loi de Newton, deux masses ponctuelles m_1 et m_2 séparées d'une distance r , s'attirent selon une force F , dirigée suivant la droite qui les joint.

$$F = G \frac{m_1 m_2}{r^2}$$

Avec G , la constante de gravitation universelle. La valeur de gravité est fonction des masses présentes autour du point de mesure. Ainsi, un excès ou un manque de masse dans le sous-sol a une influence sur le champ gravimétrique mesurable depuis la surface mais aussi depuis la profondeur.

En faisant l'hypothèse que le contexte géologique est identique entre deux mesures, les variations temporelles du signal gravimétrique peuvent être reliées à des variations de stock d'eau. Selon l'hypothèse de Bouguer, la différence de signal gravimétrique (Δg) peut alors être transcrite en une variation de lame d'eau d'extension infinie et de hauteur (h), à l'aide de l'équation suivante :

$$\Delta g = 2\pi \cdot \rho_w \cdot G \cdot h$$

Avec, ρ_w correspond à la masse volumique de l'eau.

4. 3. 3 Matériel utilisé :

Pour réaliser des mesures gravimétrique, divers équipements sont nécessaires, notamment :

- Gravimètre : c'est l'instrument principal utilisé pour mesurer les variations de la gravité.
- GPS : les systèmes de positionnement global (GPS) sont utilisés pour déterminer avec précision la position de l'instrument gravimétrique lors des mesures.
- Ordinateur et logiciel : un ordinateur est nécessaire pour collecter, stocker et analyser les données gravimétriques.
- Support de mesure : pour assurer la stabilité de l'instrument gravimétrique, un trépied ou un support de mesure est souvent utilisé pour le maintenir en place pendant les mesures.
- Marqueurs de repère : des marqueurs de repère au sol sont parfois utilisés pour identifier les emplacements de mesure et pour référencer les données.

En utilisant ces équipements, les géophysiciens peuvent recueillir des données de gravité précises qui sont essentielles pour diverses applications, notamment la cartographie géologique, la prospection pétrolière, la surveillance des mouvements tectoniques et la recherche en géophysique.

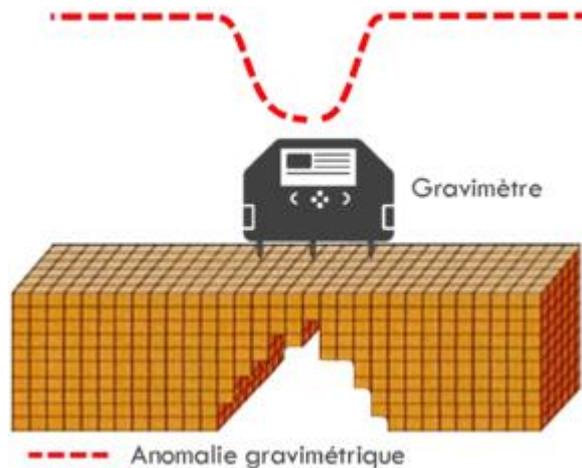


Figure III.7 : Principe de fonctionnement de la gravimétrie

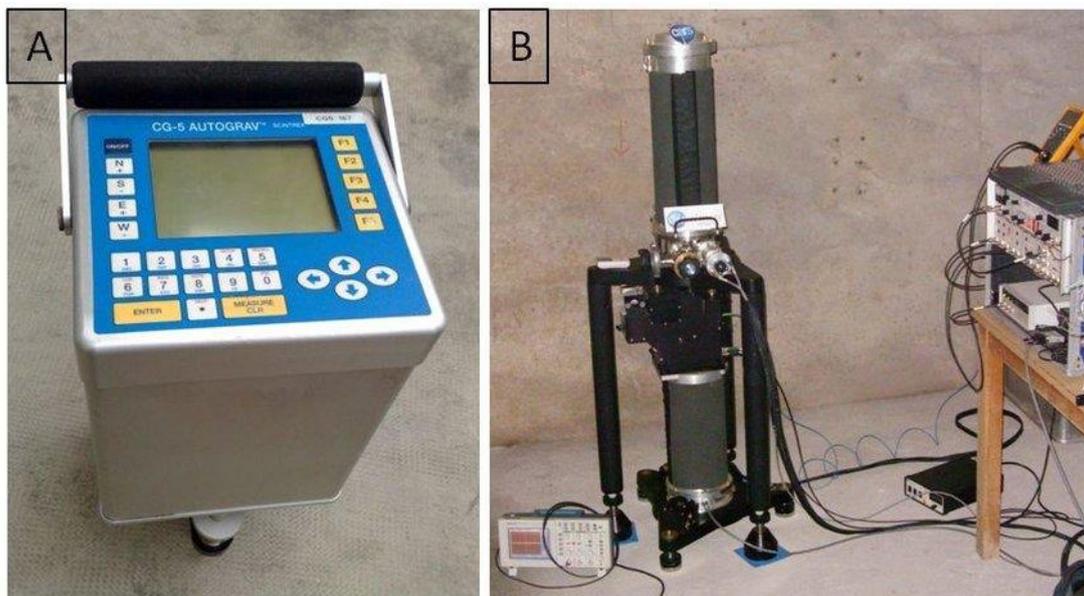


Figure III.8 : Matériel utilisé. (A) Gravimètre CG5 ; (B) Gravimètre FG5

4. 3. 4 Stratégie de mesures :

Voici les principales étapes de la stratégie de mesure en gravimétrie :

- Planification : avant de commencer les mesures, il est essentiel de planifier soigneusement la campagne de gravimétrie.
- Sélection des instruments : le choix des instruments de mesure est crucial. Les gravimètres sont utilisés pour mesurer la variation de la gravité.
- Collecte des données : les mesures gravimétriques sont effectuées en enregistrant la variation de la gravité à différentes stations de mesure. Il est important de noter l'heure et la position de chaque mesure.

- Correction des données : les données brutes de gravimétrie doivent être corrigées pour tenir compte de diverses perturbations, telles que l'altitude, la topographie, les variations atmosphériques. Ces corrections sont essentielles pour obtenir des données précises.
- Analyse des données : une fois que les données ont été corrigées, elles sont analysées pour extraire des informations géologiques ou géophysiques.
- Rapport et interprétation : les résultats de l'étude sont généralement présentés dans un rapport technique.

En résumé, la gravimétrie est une méthode géophysique qui implique la collecte de données sur les variations de la gravité, leur correction et leur interprétation pour comprendre les caractéristiques géologiques ou géophysiques de la région étudiée. La précision des mesures et la rigueur de l'analyse sont essentielles pour obtenir des résultats fiables.

4. 4 Géoradar (GPR) :

4. 4. 1 Définition :

Le radar géologique ou géoradar est une technique géophysique permettant d'obtenir de l'information sur le sous-sol, de faire l'évaluation des chaussées et la détection d'objets enfouis en un temps très court et avec une résolution inégalée.

4. 4. 2 Principes :

Le principe de fonctionnement du géoradar (ou GPR) est basé sur l'utilisation des ondes électromagnétiques de hautes fréquences comprises entre 10 MHz et 1 GHz. Dans une telle gamme de fréquence, la propagation des ondes EM est influencée par la permittivité diélectrique (ϵ) qui devient le facteur prépondérant face à la résistivité (ρ).

Le géoradar comporte deux antennes, une antenne émettrice déclenche un train d'ondes électromagnétiques qui se propage dans le sous-sol à une vitesse variable selon les terrains et la teneur en eau, de l'ordre de 10 cm/ns. Lorsque le train d'ondes rencontre des interfaces géologiques, la partie réfléchi remonte vers la surface et l'antenne réceptrice enregistre le signal. Les deux antennes sont peu à peu décalées et les mesures sont répétées de manière à créer un profil. La profondeur d'investigation du GPR peut varier de près de 100 m sur la glace à moins de 1 m en milieu argileux.

4. 4. 3 Matériel utilisés :

Cette méthode utilise un équipement spécifique pour détecter et étudier les caractéristiques du sous-sol. Voici le matériel généralement utilisé pour cette méthode :

- Antenne géoradar : c'est l'élément essentiel du géoradar. Il émet des signaux radar vers le sol et reçoit les signaux réfléchis. Il existe différents types d'antennes, en fonction des besoins de l'étude.
- Système de contrôle et d'acquisition de données : cela comprend un ordinateur ou une unité de contrôle qui gère la transmission des signaux radar, l'acquisition des données et le stockage des informations collectées.
- Emetteur-récepteur : il génère les signaux radar et reçoit les signaux réfléchis par le sous-sol. Ces données sont ensuite converties en informations exploitables.
- Antenne de déploiement : cette antenne est placée sur le terrain, généralement à la surface du sol, est placée pendant l'étude pour recueillir des données sur une zone spécifique.
- Unité d'alimentation : fournit l'alimentation électrique nécessaire à l'ensemble du système.
- Logiciel de traitement des données : les données brutes collectées doivent être traitées pour créer des images et des profils du sous-sol.
- Accessoires et équipement de terrain : cela peut inclure des câbles, des trépieds, des marqueurs de terrain et d'autres accessoires nécessaires pour l'installation et le fonctionnement du géoradar sur le terrain.

Le géoradar est utilisé dans divers domaines, notamment l'archéologie, la géologie, l'ingénierie civile, la recherche environnementale et la détection des structures souterraines. La configuration précise du matériel peut varier en fonction des besoins spécifiques de l'application et de la profondeur de pénétration requise.

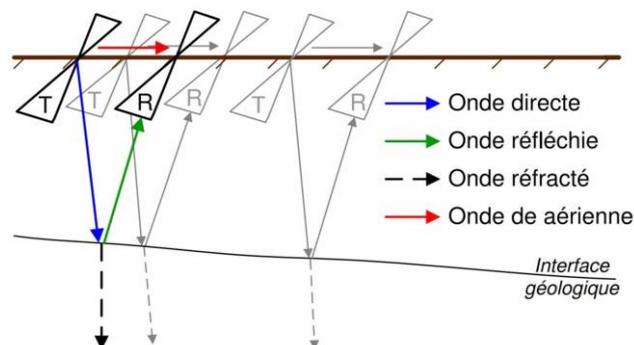


Figure III.9 : Principe du GPR

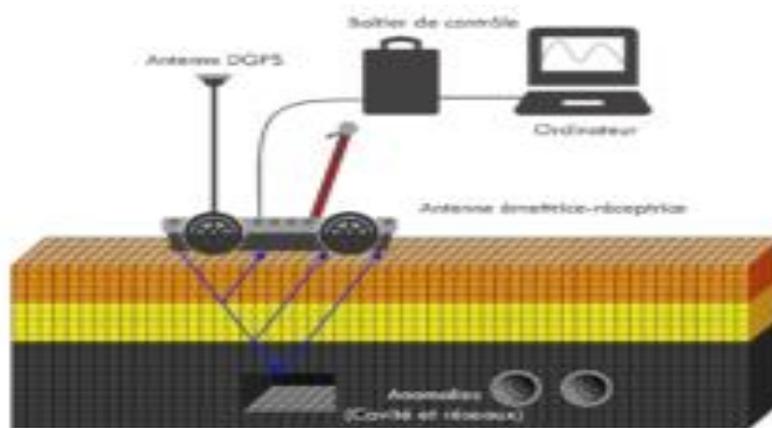


Figure III. 10 : Le radar géologique

4. 5 Résonance magnétique des protons :

4. 5. 1 Définition :

Elle est également connue sous le nom de RMN (Résonance Magnétique Nucléaire) ou NMR (Nuclear Magnetic Resonance en anglais), est une technique de mesure utilisée principalement en chimie, en physique et en médecine, mais elle peut également être appliquée en géophysique.

En géophysique, la RMN des protons est une méthode non destructive qui permet d'analyser la composition chimique et la structure des matériaux souterrains, tels que les roches, les sols, les sédiments ou les fluides, en mesurant la réponse des noyaux d'hydrogène (protons) présents dans ces matériaux aux champs magnétiques. Elle peut être utilisée pour obtenir des informations sur la porosité, la perméabilité, la saturation en eau et d'autres propriétés des formations géologiques. Cette technique est précieuse pour l'exploitation pétrolière, la cartographie géologique et d'autres applications en géophysique.

4. 5. 2 Principes :

Le principe de la mesure RMP consiste à émettre un champ magnétique perturbateur durant un temps (τ) à une fréquence spécifique (fréquence de Larmor) et une intensité (I) afin de modifier l'état d'équilibre naturel du spin des protons des molécules d'eau qui sont initialement influencées par le champ magnétique terrestre. Après la fin de l'émission du champ magnétique, un temps mort instrumental (τ_d) est actuellement inévitable avant de pouvoir mesurer la décroissance du signal RMP (ou signal de relaxation). L'amplitude initiale (E_0) du signal n'est pas mesurable du fait du temps de coupure instrumental (τ_d) nécessaire pour effectuer la commutation entre transmission et réception. L'amplitude initiale est approximée

à l'aide de l'équation [1] qui considère que le signal décroît de façon exponentielle avec le temps.

$$E_0 = E_{\tau d} \cdot \exp\left(\frac{\tau d}{T^*_2}\right) \quad [1]$$

4. 5. 3 Matériel utilisés :

Cette méthode utilise généralement les équipements suivants :

- Magnétomètre RMN : c'est un champ magnétique statique puissant et détecte les signaux de résonance magnétique des protons dans l'échantillon géologique.
- Sondes RMN : ce sont des antennes spéciales conçues pour émettre des impulsions de radiofréquence et détecter les signaux RMN émis par les protons dans le sol ou la roche.
- Système de contrôle électronique : il est nécessaire pour générer des impulsions de radiofréquence précise, contrôler le magnétomètre RMN et acquérir les données de résonance.
- Logiciel de traitement des données : des logiciels sont utilisés pour traiter et analyser les signaux RMN capturés, permettant de produire des images ou des spectres des propriétés géophysiques de la subsurface.
- Bobines en gradient : elles sont parfois utilisées pour améliorer la résolution spatiale des images RMN en créant des champs magnétiques locaux supplémentaires.
- Générateurs de radiofréquence (RF) : ils produisent les impulsions RF nécessaires pour exciter les protons dans l'échantillon et enregistrer leurs signaux de résonance.

Ces composants sont essentiels pour mener des études géophysiques basées sur la RMN afin de caractériser la composition et la distribution des protons dans les matériaux souterrains.

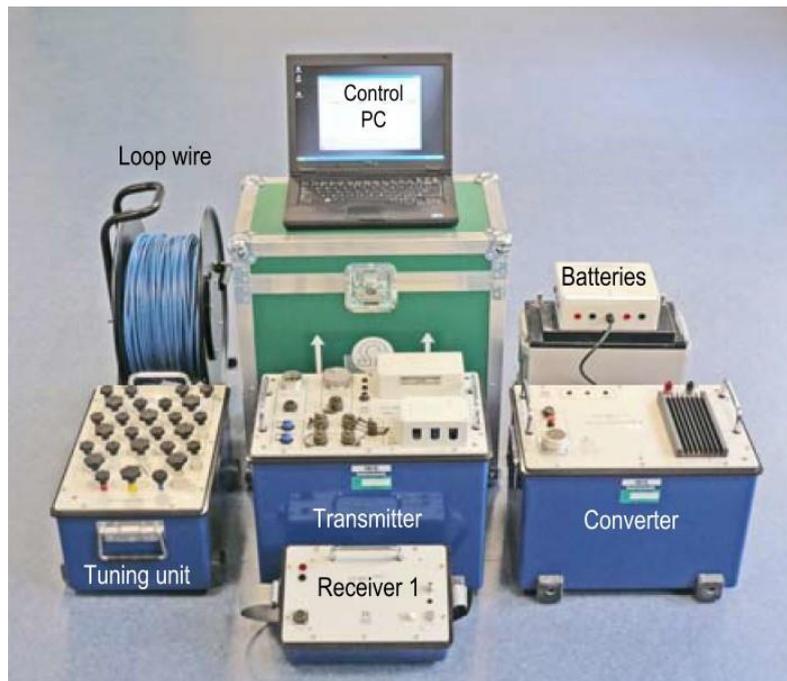


Figure III. 11: Le matériel utilisé pour la résonance magnétique

4. 5. 4 Stratégie de mesures :

Voici quelques mesures et stratégie importantes associées à cette méthode :

- Acquisition des données : la première étape consiste à générer un signal RMN en exposant l'échantillon au champ magnétique. Les données RMN sont ensuite acquises à l'aide d'un spectromètre RMN.
- Analyse des spectres : les spectres RMN obtenus sont analysés pour identifier les pics de résonance associés aux noyaux de protons dans l'échantillon.
- Calibration : il est essentiel de calibrer l'instrument pour obtenir des mesures précises.
- Interprétation des données : les données RMN sont interprétées pour déterminer la structure chimique des composants présents dans l'échantillon.
- Cartographie géophysique : en utilisant la méthode RMN de manière géo spatiale, il est possible de cartographier la distribution des composants chimiques dans une zone donnée.
- Profondeur de pénétration : la profondeur à laquelle la méthode RMN peut détecter les protons dépend de nombreux facteurs, notamment la fréquence de résonance, la puissance du champ magnétique et les propriétés de l'échantillon.

- Applications spécifiques : la RMN du proton peut être utilisée pour des applications telles que la caractérisation des réservoirs pétroliers, l'analyse des sols, et bien d'autres.

En résumé, la stratégie de mesures de la méthode géophysique RMN des protons implique l'acquisition, l'analyse, l'interprétation des données RMN pour obtenir des informations sur la composition et la structure des matériaux dans diverses applications géophysiques et environnementales.

5. Interprétation couplée :

C'est une approche avancée qui combine différentes techniques géophysiques pour caractériser les formations karstiques. Cela peut inclure l'utilisation de méthodes telles que la sismique, la géoradar, la résistivité électrique, la gravimétrie, et d'autres pour obtenir une image plus complète du sous-sol karstique. Cette approche permet de mieux comprendre la structure et les propriétés des formations karstiques, ce qui est important pour des applications telles que la gestion de l'eau souterraine et la prévention des risques liés au karst, tels que l'effondrement de cavités.

A l'échelle saisonnière, les différentes investigations géophysiques ont permis de mettre en évidence les variations du signal géophysique liées aux fluctuations du stock d'eau. Ces variations s'opèrent à plusieurs niveaux de la ZNS du karst. La tomographie électrique permet d'évaluer rapidement et de manière distribuée l'état d'humectation des premiers horizons du sous-sol. La RMP et la gravimétrie sont particulièrement utiles pour détecter des variations de teneurs en eau à plusieurs dizaines de mètres de profondeur.

Voici comment certaines méthodes géophysiques peuvent être appliquées de manière couplée pour une recherche :

- La résistivité électrique : l'interprétation des données de résistivité peut indiquer la présence de formations aquifères.
- La sismique réfraction : en combinant les données de résistivité avec celles de la sismique réfraction, vous pouvez avoir une meilleure compréhension de la géologie sous-jacente et de la manière dont l'eau circule dans le sous-sol.
- La géoradar (GPR) : en utilisant conjointement avec d'autres méthodes, vous pouvez cartographier les réseaux karstiques et estimer la capacité de stockage d'eau souterraine.

- Les méthodes de forage : bien que ce ne soit pas une méthode géophysique, le forage peut être guidé par les informations obtenues à partir des méthodes géophysiques pour accéder aux ressources en eau souterraine.

6. Objectif de la géophysique appliqué sur le karst :

6. 1 Les limites de l'aquifère :

L'objectif de la géophysique est de comprendre et de caractériser les propriétés géologiques et hydrogéologiques des formations rocheuses qui délimitent l'aquifère. Cela permet de mieux comprendre la distribution de l'eau souterraine, la recharge de l'aquifère, et les zones où l'eau peut sortir ou entrer dans l'aquifère.

Les méthodes géophysiques telles que la sismique réflexion, la tomographie électrique, la géoradar, et d'autres techniques, peuvent être utilisées pour détecter et cartographier les variations de la lithologie, de la porosité et de la perméabilité des formations rocheuses aux limites de l'aquifère.

Cette information est cruciale pour la gestion durable des ressources en eau souterraine et la prévention de la contamination de l'aquifère.

6. 2 Les discontinuités structurelles :

En utilisant diverses méthodes géophysiques telles que la sismique, la gravimétrie, la magnétométrie et la géoradar, les géophysiciens peuvent détecter et caractériser les discontinuités structurelles, telles que les failles, les plis, les fractures et les interfaces entre différentes formations géologiques.

Cela permet de mieux comprendre la subsurface terrestre, de localiser des ressources naturelles telles que les minéraux, les hydrocarbures ou les réserves d'eau, et d'évaluer les risques géologiques tels que les tremblements de terre et les glissements de terrain.

En résumé, l'objectif principal de la géophysique appliquée sur les discontinuités structurelles est de fournir des informations cruciales pour diverses applications géologiques et environnementales.

6. 3 Les passages préférentiels de l'eau ou concentrations des infiltrations :

L'objectif de la géophysique est de détecter, cartographier et comprendre la distribution des fluides souterrains, tels que l'eau, dans le sous-sol.

Cela peut être crucial pour diverses applications, notamment la gestion des ressources en eau, la prévention des inondations, la protection de l'environnement et la recherche de ressources naturelles.

Les méthodes géophysiques, telles que la tomographie électrique, la sismique ou la géoradar, sont utilisées pour recueillir des données non invasives et obtenir des informations sur la structure et la perméabilité du sous-sol à des endroits spécifiques, permettant ainsi de mieux gérer les zones vulnérables aux infiltrations ou aux concentrations d'eau.

6. 4 Les cavités vides :

L'objectif de la géophysique est de détecter, caractériser et évaluer ces espaces souterrains sans avoir besoin de les ouvrir physiquement.

Cela peut être crucial dans divers domaines tels que l'exploration minière, la recherche d'eau souterraine, la gestion des ressources naturelles, la sécurité des infrastructures, et même la recherche archéologique pour localiser des cavités anciennes.

Les méthodes de géophysique, telles que la sismique, la résistivité électrique, la gravimétrie et la géoradar, sont utilisées pour collecter des données non invasives et fournir des informations précieuses sur la structure, la taille et la composition des cavités souterraines.

Cela aide à prendre des décisions éclairées en matière de sécurité et de gestion des ressources.

6. 5 Les cavités pleines d'eau :

L'objectif de la géophysique est de cartographier et analyser ces cavités souterraines remplies d'eau.

Cette approche utilise différentes méthodes géophysiques, telles que la sismique, la géoradar, la gravimétrie et la magnétométrie, pour obtenir des informations sur la structure, la taille, la profondeur et parfois même la qualité de l'eau dans ces cavités.

Ces données sont essentielles pour diverses applications, notamment la gestion des ressources en eau, la détection des risques d'effondrement de cavités, et la protection des infrastructures situées à proximité de ces zones.

7. Conclusion :

L'application des méthodes géophysiques dans l'étude des karsts offre des avantages significatifs pour la caractérisation de ces environnements complexes.

Ces méthodes, telles que la sismique, la géoradar, la résistivité électrique, et la gravimétrie, permettent d'obtenir des informations essentielles sur la structure, la distribution des vides, et la connectivité des systèmes karstiques.

Elles sont particulièrement utiles pour la gestion des ressources en eau, la prévention des risques géotechniques, et la préservation des écosystèmes karstiques fragiles.

Le principal objectif d'une étude géophysique de proche surface est de déterminer la nature du sous sol.

Une étude géophysique appliquée à l'hydrogéologie peut fournir de nombreuses informations utiles telles que le type de dépôts, la présence et la localisation d'un aquifère, la géométrie de cet aquifère (extension latérale et variabilité de l'épaisseur), la profondeur de la nappe et les structures sédimentaires des dépôts.

CONCLUSION GENERALE

Conclusion générale :

En conclusion, les méthodes géophysiques jouent un rôle essentiel dans la recherche des ressources en eau dans les pays karstiques.

Grace à des techniques telles que la prospection électrique, la sismique réflexion, et la tomographie électrique, les géophysiciens peuvent cartographier les formations karstiques complexes et identifier les zones propices à la présence d'eau souterraine.

Cependant, il est important de noter que l'efficacité des méthodes géophysiques peut varier en fonction des conditions spécifiques du karst, de sa géologie, et de sa profondeur.

Une approche intégrée, combinant plusieurs techniques géophysiques, ainsi qu'une bonne connaissance du contexte géologique local, sont souvent nécessaires pour obtenir des résultats précis.

En fin de compte, l'application judicieuse des méthodes géophysiques dans l'étude des karsts peut grandement contribuer à une meilleure compréhension de ces environnements uniques et à des prises de décision éclairées pour leur gestion et leur préservation.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

Références bibliographiques

Bensaoula, F. et Collignon, B., (2022). Les Monts de Tlemcen. In : book : Karsts et Grottes d'Algérie. Les principales régions karstiques d'Algérie et leurs cavités les plus remarquables. geomorphology and environmental change. Association Française de Kartologie, pp. 156–186 (Chapter 10) : Le Tell Oranais. Karstologia Mémoires n°27-2022.

Bensaoula F., [2007]- Etude de la karstification à partir des données de forages : le cas des Monts de Tlemcen (Algérie). In: Karstologia : revue de karstologie et de spéléologie physique, n°49, pp. 15-24.

Bensaoula .F ; ADJIM.M ; Bensalah.M., [décembre 2007] - l'importance des eaux karstiques dans l'approvisionnement en eau de la population de tlemcen , Université Abou Bekr Belkaïd de Tlemcen, n°06 ;pp.57-64.

Bensaoula F ; Bensalah.M.ADJIM.M .,[juin 2005]- les forages récents dans les aquifères karstiques des monts de tlemcen .Université Abou Bekr Belkaïd de Tlemcen,n°04 ;pp.7-15.

Eric gilli,[septembre 2011] -karstologie karsts grottes et sources ;pp 256 .

M. Konstantinos CHALIKAKIS, [2006] . Application de méthodes géophysiques pour la reconnaissance et la protection de ressources en eau dans les milieux karstique. Thèse de doctorat, université de Paris 6.

Simon damien carrière, 13février 2014 ; thèse etude hydrogéopysique de la structure et du fonctionnement de la zone non saturé du karst.