UNIVERSITE KASDI MERBAH OUARGLA



Faculté des sciences de la nature et de la vie et des sciences de la terre et de l'univers Département des Sciences de la Terre et de l'Univers

MEMOIRE DE MAGISTER

En géoscience et environnement

Option Géochimie de surface et environnement

Présenté par

KOLLI Adil

Ingénieur d'état en géologie de l'ingénieur

Encadré par Dr AISSANI Belkacem

THEME

ETUDE DES EFFONDREMENTS DU SAHARA SEPTENTRIONAL CAS : M'RARA GUERRARA ET MANSOURAH

Soutenue publiquement Devant le jury composé de :

Président :Dr NEZLI Imed EddineExaminateur :Dr HACINI MessaoudExaminateur :Dr DJIDEL MohamedPromoteur :Dr AISSANI Belkacem

Maitre de conférences AUniversité d'OuarglaMaitre de conférences AUniversité d'OuarglaMaitre de conférences AUniversité d'OuarglaMaitre de conférences AUniversité d'Ouargla

Année universitaire 2011/2012

ETUDE DES EFFONDREMENTS DU SAHARA SEPTENTRIONAL CAS ; M'RARA, GUERRARA ET MANSOURAH

Résumé

Le Sahara septentrional se caractérise par des affleurements d'âges Tertiaire et Quaternaire ; des conglomérats de base et des encroutements de calcaires du Villafranchien supérieur, des calcaires blanchâtres lacustres du Pliocène continental, et des dépôts Mio-pliocène qui se constituent des sables, des argiles, des limons et du gypse. Ces formations Tertiaires et Quaternaires dénotent l'existence d'un réseau de discontinuités qui se traduit principalement à l'échelle des affleurements par des diaclases et des fissures de dimension variables allant de quelques centimètres à plusieurs dizaines de mètres.

La circulation et l'infiltration des eaux de surface, principalement ; les eaux d'irrigations et surtout les eaux des crues se fait à travers les discontinuités existantes, se sont les lieux privilégiés pour que l'altération hydrique débute. L'eau et ses actions de dissolution et d'érosion provoquent une dégradation de la résistance mécanique des terrains traversés et génère une porosité secondaire dans les matériaux originellement non poreux. Il conduit ainsi à l'élargissement des fissures et par conséquent la création et le développement des cavités souterraines, donc le processus finit par l'apparition d'effondrements à la surface à savoir ; les effondrements de la région de M'rara, l'effondrement de Sahb-Elbir à Mansourah, et l'effondrement de Tafziouine à Guerrara. Ces effondrements causent un danger permanent à la vie humaine, animale et aussi les terres agricoles.

Mots clés ; Eau, dissolution, M'rara, Effondrement, Sahara septentrional

STUDING COLLAPSES OF THE NORTHERN SAHARA CASES ; M'RARA, GUERRARA ET MANSOURAH

Abstract

The northern Sahara is characterized by outcrops of Tertiary and Quaternary âge; basic conglomerates and limestone crusts Villafranchian higher, white lacustrine limestones of Pliocene continental, and Mio-Pliocene deposits which are formed by sands, clays, silts and gypsum. These tertiary and quaternary formations indicate the existence of a network of discontinuities resulting primarily on the scale of outcrops by joints and cracks of varying sizes ranging from a few centimeters to several tens of meters.

Circulation and infiltration of surface water primarily; irrigation water and especially the flood waters is through existing discontinuities, were the places for the water damage begins. Water with actions of dissolution and érosion causing degradation of the mechanical strength of the land crossed and generates a secondary porosity in the materials originally non porous. It thus leads to the enlargement of cracks and leads therefore to the creation and development of underground cavities. So the process ends by the appearance of collapses on the surface such as, the collapse of the region M'rara, the collapse of Sahb-Elbir in Mansourah, and the collapse of Tafziouine in Guerrara. Theses collapses cause a permanent danger to human life animal as well and agricultural land.

Keywords ; Water, dissolution, M'rara, collapse, northern Sahara.

دراسة انهيارات الصحراء الشمالية حالات: مرارة, قرارة و منصورة

ملخصص

تتميز الصحراء الشمالية بنتوءات تعود إلى العصر الجيولوجي الثالث و الرابع والتي تتمثل في الكونقلوميرا في القاعدة و الطبقات الكلسية التي تمثل الفيلافرونشيا الأعلى, الكلس البحيري الأبيض البليوسيني القاري, ترسبات الميوبليوسان التي تتكون من الرمل, الطين, الغرين, الجبس. هذه التشكيلات الجيولوجية تشير إلى وجود شبكة من الانقطاعات و التي تتمثل اساسا من خلال مقياس النتوءات في التفسخات والشقوق بأحجام متفاوتة تتراوح بين بضعة سنتيمترات إلى عدة عشرات من الأمتار.

سيلان وتغلغل المياه السطحية والمتمثلة أساسا في مياه الري وبخاصة مياه الفيضانات يتم من خلال الانقطاعات الموجودة في التشكيلات الجيولوجية و التي تعتبر الأماكن المفضلة من خلالها يبدأ الضرر المائي. يتسبب الماء من خلال إجراءات التحلل و الجرف في ضعف و تأكل القوة الميكانيكية للصخور و يساهم في خلق مسامية ثانوية لدى بعض الصخور التي لا تملك هده الخاصية. حيث يؤدي إلى توسيع الشقوق و السراديب الباطنية و با لتالي خلق وتطوير تجاويف تحت الأرض وفي الخاصية. حيث يؤدي إلى توسيع الشقوق و السراديب الباطنية و با لتالي خلق وتطوير تجاويف تحت الأرض وفي الاخير تنتهي العملية بغور و الشورة و السراديب الباطنية و با لتالي خلق وتطوير تجاويف تحت الأرض وفي الاخير تنتهي العملية بظهور انهيارات على السطح مثل: انهيارات مرارة بولاية وادي سوف, انهيار سهب البير في منطقة منصورة و انهيار تعلي السلح مثل: انهيارات مرارة بولاية وادي سوف, انهيارات تمثل خطردائم على حياة منصورة و انهيارات من منطقة قرارة بولاية غرداية. هده الانهيارات تمثل خطردائم على حياة الانسان والحيوان فضلا عن الاراضي الزراضي الزراضي والانسان والحيوان فضلا عن الاراضي الزراضية قرارة بولاية خرداية. هده الانهيارات تمثل خطردائم على حياة الانسان والحيوان فضلا عن الاراضي الزراضية.

الكلمات الرئيسية: الماء, فوبان, مرارة, الصحراء الشمالية.

Introduction générale

Limiter les risques naturels est une nécessité primordiale pour la planification spatiale de l'aménagement du territoire. La mise en évidence des principaux facteurs physiques qui ont un impact sur l'occupation et l'affectation du sol tel que les effondrements devient une préoccupation majeur chez les autorités locales (Aissani et al., 2010). Le phénomène naturel abordé dans cette étude concerne les effondrements de terrain qui affectent le Sahara septentrional et qui représente un véritable danger car ils provoquent généralement des dégâts humains, matériels et environnementaux. Ces effondrements sont soit naturels ou anthropiques, profonds ou superficiels, tel que les effondrements de M'rara dans la wilaya d'El oued, les effondrements de Berkaoui et Bhier à Ouargla et les effondrements de Sahb-Elbir et Tafziouine à Ghardaïa.

La région de M'rara au Sahara algérien est une zone agricole grâce à l'exploitation des nappes artésiennes, ses terrains sont fertiles à cause des alluvions fluviatiles transporté par Oued R'tem, ses affleurements sont d'âges tertiaires et quaternaires. Les terrains de M'rara dénote l'apparition d'évènements d'effondrements indésirables qui sont liés à l'instabilité des cavités souterraines, et qui menace la vie humaine, animale et aussi les terres agricoles dans cette région Saharienne.

Ce travail porte en premier lieu sur la réalisation d'un diagnostic des effondrements qui constituent un danger permanent dans la région de M'rara et en second lieu de cerner les causes ayant contribué à la formation de ces derniers. Donc afin d'arriver à nos objectifs, une méthodologie d'études et d'analyses a été suivis, tout d'abord, on a entamé notre étude par la consultation et l'exploitation des cartes existantes et d'archives disponibles du secteur d'étude, aussi des enquêtes orales avec la population locale ont été faites. Ensuite des travaux de terrain ont étés effectués (coupes géologiques, échantillonnages des sols et des eaux, prise des photos), avant de passer à l'application d'une investigation géophysique par sondages électriques verticaux, et on a fini par les travaux manipulés au sein des laboratoires, dans lesquels on a effectuées des analyses chimiques (teneur en gypse, en calcite), et minéralogiques (confection des lames minces, les rayons X) pour les échantillons du sol et pour les eaux de la nappe phréatique et les eaux de surface, on a fait des analyses physico-chimiques et vers la fin, on a terminé par le calcul des débits maximaux des crues qu'a connue la région de M'rara.

Le mémoire proposé est structuré selon quatre parties :

La première partie, est une synthèse bibliographique des travaux antérieurs.

La deuxième partie, a été donné l'explication de la méthodologie d'étude

La troisième partie, relevant la présentation des résultats avec leurs interprétations et la discussion des effondrements de M'rara, Guerrara et Mansourah.

La quatrième partie, représente le résultat final de notre étude dans laquelle on a déduit une conclusion générale suivie par des recommandations.

Contexte géographique

I. 1. La région de M'rara dans la wilaya d'El Oued

I. 1.1. Localisation géographique et limites

La région de M'rara est située dans la wilaya d'El oued, au Nord-Est du Sahara algérien (**Fig.01**), à environ 110km à l'Ouest du chef lieu de la wilaya, à 55km au Nord-Ouest de Touggourt et à 32km à l'Ouest de Djamaa.



Fig. 01: Situation géographique de la région M'rara.

M'rara est une partie de la vallée de oued Righ. Elle s'étend au pied de l'Atlas saharien entre les coordonnées de Longitude : $X = 5^{\circ} 35' 17''$; $X = 5^{\circ} 43' 59''$

Et d'altitude : $Y = 33^{\circ} 31'48''$; $Y = 33^{\circ} 24' 36''$

Elle est limitée : (Fig. 02)

- > Au Nord par Bled Sedra, et le plateau de Merdaf;
- ➢ A l'Est par Chott Amar;
- Au Sud-Est par, chott Anat
- > Au Sud-Ouest par Bled Lebreg et le Chott de Dzioua.
- ➤ A l'Ouest par Bled Zmender. (C.D.R.S., 2009)



Fig. 02: les limites de M'rara (Carte d'Afrique 1/500000. IGN. F, Ghardaïa, 1963).

I. 1.2. Les sols de M'rara

La région de M'rara constitue un point de rupture de pente au niveau duquel les alluvions fluviatiles transportés par Oued R'tem passant par M'rara, s'accumulent depuis probablement la fin du pliocène. Ceci pourrait en partie explique la fertilité de la terre à M'rara qui lui a aussi valu le surnom de petite Mitidja en référence au champ fertile algérois. (Guemache et al.,2008).

I. 1.3. L'agriculture à M'rara

Les principales activités économiques locales à M'rara sont l'élevage et l'agriculture. Celle-ci Occupe plus de 50% de la population active, donnant à la région sa vocation agricole. La production des dattes dominent avec plus de 60% de la production agricole annuelle. Les cultures maraichères notamment celle de la pomme de terre, les cultures industrielles des arachides, du tabac et plus récemment l'oléiculture occupent le reste de la production annuelle. Cette activité agricole a été rendue possible dans cette région saharienne, grâce à l'exploitation des nappes phréatiques libres superficielles, ou depuis les années cinquante, à travers la réalisation de forages hydrauliques pour exploiter les nappes captives, en particulier celle de l'albien. (Guemache et al., 2008).

I. 2. L'effondrement de Tafziouine à Guerrara, wilaya de Ghardaïa

I. 2.1. Historique et géographie

En 1997 et à 07 km au Sud-Ouest de Guerrara (Fig. 03), dans la région dite Tafziouine le terrain a commencé à connaître une véritable déformation sous forme d'un effondrement engendrant un cratère de 22 mètres de diamètres et de 13 mètres de profondeur.

Le phénomène d'effondrement de terrain a été motivé par l'infiltration des eaux provenant d'un forage artisien jaillissant à 150 mètres de distance lors de la phase d'auto développement qui a duré plusieurs jours. Le forage de Tafziouine a été réalisé par la firme STEPPE FORAGE en 1997 dans le cadre des grands travaux CDARS.



Fig.03: la situation géographique de l'effondrement de Tafziouine

(Carte d'Afrique 1/500000. IGN. F, Ghardaïa, 1963)

I. 3. L'effondrement de Sahb-Elbir à Mansourah, wilaya de Ghardaïa

I. 3.1. Situation géographique

L'effondrement de Sahb-Elbir est situé à 50km par la piste du village d'Ain Lossig (**Fig. 04**), lui même distant de 2 km du chef lieu communal de Mansourah. Cette région appartient à la wilaya de Ghardaïa.



Fig.04 : Situation géographique de l'effondrement Sahb-Elbir. (Sonatrach, 1971. Echelle ; 1/2500 000)

Climatologie et hydrographie

II .1. Les données climatiques de la région de M'rara

La région de M'rara est caractérisée par un climat aride de type saharien avec des étés secs et chauds et des hivers plus doux. Les écarts entre les températures diurnes et nocturnes sont importants, dépassent souvent les 20°. (Guemache et al., 2008).

La station de Touggourt d'après sa situation géographique représente la station la plus proche de la zone d'étude (**Tab. 01**), dont les coordonnées sont : (Longitude = 6° 13' E, Latitude = 33° 12'N, Z= 85m).

A cet effet l'étude climatique s'est basée sur les donnés de la station de Touggourt vu sa représentativité.

Tab. 01: Distribution mensuelle moyenne des c	caractéristiques climatiques	Pour la période
---	------------------------------	-----------------

Mois	J	F	Μ	Α	Μ	J	J	Α	S	0	Ν	D	Моу
T (°c)	10,5	12,6	16	20	25,3	30	32,9	32,7	28,5	22,3	15,4	11,3	21,45
Vent (m/s)	2,58	2,74	3,3	3,9	4	3,82	3,34	2,91	2,89	2,67	2,48	2,56	3,1
H (%)	65	55,6	49,3	44,6	42,2	37	33	34,7	44,2	52,3	42,6	66,8	47,3

(19676-2007). (O.N.M. Touggourt).

II. 1.1. La température

La température de l'air est un paramètre particulièrement important qui contrôle les phénomènes suivants :

- L'infiltration de l'eau dans le sol, en fonction de l'évaporation et de la transpiration des végétaux ;
- La nature des précipitations solides ou liquides. (Mathevet, 2002).

D'après une étude des normales mensuelles de la température de l'aire à la station de Touggourt qui est basée sur une chronique de 40ans (1967 – 2007), les mois les plus chauds en degré sont : Juin (30), juillet (32,9), Aout (32,7), septembre (28,5), et les plus froids sont : Décembre (11,3), Janvier (10,5), Février(12,6). La température moyenne annuelle est égale à 21,45°C.

II. 1.2. Le vent

Les vents sont importants au printemps et peuvent atteindre des vitesses de 40 à 50km /h. (Khadraoui, 2007).

L'étude des normales mensuelles des vents à la station de Touggourt basée sur une chronique de 40ans (1967 – 2007), nous a permet de déterminer le régime du vent. La vitesse maximale a été enregistrée au mois de Mai (4 m/s), dont la vitesse minimale est de (2,48 m/s). La vitesse moyenne annuelle du vent est égale à (3,1 m/s).

II. 1.3. L'humidité relative

D'après le tableau qui présente les moyennes mensuelles de l'humidité relative à la station de Touggourt d'une période de 40ans ; la valeur maximale est de l'ordre de 66,8% au mois de décembre, tandis que la minimale est de l'ordre de 33% au mois de juillet, dont la valeur moyenne mensuelle est de 47,3%.

II. 1.4. Les précipitations

Généralement, les précipitations sahariennes sont rares, de faible importance quantitative, de courte durée et qu'elles ont un pourcentage élevé de pluies avortées à cause de la siccité de l'atmosphère (Dubief, 1963 in Conrad, 1969)

D'après une étude d'une série quarantaine (1967-2007) à la station de Touggourt (Tab. 19), il apparait que les précipitations ne sont pas réparties d'une manière homogène, dont la moyenne interannuelle est de l'ordre de 66,14mm. Les précipitations d'une année sèche et d'une année humide sont respectivement de ; 168,7mm pour l'année 2004, et 11,5mm pour l'année 1989.

II. 2. Le réseau hydrographique



Fig.05 : Carte des Oueds de la dorsale du M'Zab.

Il existe trois Oueds principaux drainent la moitié orientale de la région du plateau des daïas **(Fig. 05)**. Ce sont du Nord au Sud, les Oueds : Ittel, R'tem et El Attar. Seul le premier atteint encore son niveau de base primitif, le chott Merouane, les deux autres se perdent dans les bas-fonds, daïas ou sebkha. (Dubièf, 1963)

II .2.1. Oued Ittel

Cet Oued prend son origine dans la région d'Elmengoub, le plateau d'El Djouf par 475m d'altitude. Il se jette dans le chott Merouane aux environs de la cote 20, après un parcours de 165km. (Dubièf, 1963)

Il n'existe pas de poste pluviométrique dans ce bassin. Les observations d'écoulement sont pratiquement inexistantes, du moins à notre connaissance. Cet Oued coule assez fréquemment et ses crues sont parfois suffisamment violentes qui coupe la voie ferrée Biskra-Touggourt.

II .2.2. Oued El Attar

Cet Oued prend son origine sous le nom d'Oued Bel Aroug dans la région de Ras Bel Aroug, vers 760m d'altitude. Il se perd après un parcours sensiblement Ouest-Est de 180km. Il est encore susceptible de couler, mais aucune de ces crues n'atteint plus son ancien niveau de base, le chott de Dzioua. Aucune observation de crue précise n'est parvenue à notre connaissance.

II .2.3. Oued R'tem

Il atteint une longueur de 196 km environ, en prenant comme tête l'Oued Berriche, il coule sensiblement Ouest-Est de la région de Mchibigue à 720m d'altitude, à la daïa d'Hassi M'rara situé à la cote 100, qu'il gagne après être infléchi brusquement vers le Sud dans les derniers kms de son parcours. L'Oued R'tem connait souvent à l'occasion de pluies diluviennes des crues torrentielles durant lesquelles l'eau traverse les secteurs de M'rara avec une certaine violence, des structures ont été installées en amont de l'oued pour contenir la force des torrents, mais en vain puisque celles-ci n'ont pas résisté. (Dubièf, 1963).

II. 2.3.1. Le bassin versant de Oued R'tem

La détermination des paramètres du bassin versant de Oued R'tem (**Tab.02**), nous renseigne sur le comportement hydrologique du bassin versant (**Fig.06**), et interviennent dans le calcul des formules empiriques. Ces paramètres ont été déterminés sur la base de la carte topographique au 1/200000^{ème}, feuille de (Ksar Elhiran, Ain Elmelh, oued Attar et Mrhaier).

760 m

157 m

485 m

490 m

1,88 km/km2

196 km 0,39%

36h

De l'Oued R'tem au site de la digue existante. (E.N.E.HYD., 1998)						
Caractéristiques hydromorphométriques	Valeurs					
Superficie	4320 km2					
Périmètre	400 km					
Indice de compacité	1,7					

Altitude

Maximale Minimale

Moyenne

Médiane

Densité de drainage

Longueur du talweg principale

Pente moyenne du B.V Temps de concentration

Tab. 02: Tableau récapitulatif des caractéristiques hydromorphométriques du bassin versant



Fig. 06: Carte topographique au 1/500000^{éme} montrant la situation du bassin versant de Oued R'tem. (A.N.R.H. Ouargla)

Cadre géologique

III. 1. Géologie régionale

Les régions : M'rara, Guerrara et Mansourah font partie du bassin sédimentaire du Sahara Nord-Est septentrional (**Fig.07**), dont les grands traits de la géologie sont:

- Au sud de l'accident Sud atlasique, le bouclier précambrien formé de terrains éruptifs, plissés et métamorphisés surmonté par des milliers de mètres de sédiments allant du Cambrien jusqu'au Quaternaire.
- > Le Paléozoïque du Sahara correspond à des dépôts de climat désertique.

Autour des affleurements du socle, s'étagent des couches gréseuses et schisteuses des Tassilis. Les mouvements hercyniens du Pérmo-Carbonifère, vont provoquer l'érosion du bouclier. Il s'installe alors une grande période continentale avec pénéplanation post-hercynienne pendant le Trias et le Jurassique et formation d'un manteau de grès, de sable et d'argile, qui va constituer le "Continental Intercalaire".



Fig. 07: Carte géologique régionale (O.S.S., 2003).

III. 1.1. Le Paléozoïque

Cambrien : Les dépôts cambrien reposent sur le socle cristallin et sont représentés par des grès et des quartzites à passées conglomératiques.

Ordovicien : Les coupes les plus complètes se situent dans les dépressions de l'oued M'ya et de Timimoune. Les dépôts proximaux fluviatiles s'agencent autour des régions émergées et forment les falaises du Tassili interne.

Les dépôts marins se rencontrent au Nord en sub-surface et dans ce qui est devenu les chaînes de l'Ougarta.

Silurien : Cette période est caractérisée par une sédimentation terrigène fine, argileuse déposée en milieu marin.

Cette série d'apparence homogène est représentée par des argiles noires à Graptolites, des argiles à passés gréseux et des rares bancs carbonatés.

Dévonien

- > Le Dévonien inférieur est essentiellement argilo-gréseux présentent des faciès très variés.
- ➢ Le Dévonien moyen et supérieur son caractérisés par des lacunes de sédimentation.

III. 1.2. Le Mésozoïque

Le Trias: (Busson, 1972) souligne la grande variabilité de faciès et d'épaisseur du Trias. Il est divisé en grandes unités lithologiques distinctes qui peuvent être: salifères, argilo-gréseuses ou carbonatées. L'épaisseur de ces différentes formations varie principalement là où s'intercalent des bancs salifères. L'épaisseur du Trias argilo-gréseux inferieur augmente vers le Nord-Ouest entre 150-180 m. Elle diminue dans les zones des haut-fonds de Hassi Messaoud et de Rhourd. El Baguel.

Le Jurassique: Le Jurassique inferieur du Lias et le Dogger comprendent principalement des couches évaporitiques constituées essentiellement de sel, d'anhydrite et d'argile auxquelles se superposent des couches franchement marines et qui se présentent sous forme de calcaires et d'argiles avec des bancs d'anhydrites. Par contre, le Jurassique moyen est caractérisé par une transgression couvrant tout le bassin du Grand Erg Oriental et les dépôts sont épais. Le Jurassique supérieur, le Malm sont caractérisés par une permanence relative du régime marin avec des sédiments de milieux confinés.

Le Crétacé: L'étude des données de sondages qu'a effectué (Busson, 1972) a permet de préciser la succession lithologique au cours du Crétacé. Il est constitué par des couches terrigènes fluviodeltaïques qui sont en contraste lithologique et sédimentaire avec les formations marines du Jurassique supérieur. Il comprend, en parlant des formations les plus anciennes:

- Le Néocomien, comprend dans le bas Sahara des argiles vertes et rouges avec de l'anhydrite en bancs massifs plus fréquents à la base. Elles sont surmontées par une alternance de dolomies et d'argiles.
- Le Barrémien est caractérisé par un épandage généralisé des formations détritiques du Crétacé inférieur jusqu'à dans le bas Sahara. Ces formations se présentent sous forme des grés fins ou grossiers et d'argiles provenant apparemment du Sud, le Hoggar. Les intercalations carbonatées sont peu nombreuses et cantonnées au Nord- Est du Sahara algérien.
- L'Aptien représente un bon repère lithologique dans les sondages. Il est représenté dans la grande partie du bas Sahara, par 20 à 30 m en moyenne, de dolomies alternant avec des lits d'anhydrites, d'argiles et de lignites représentant une sédimentation lagunaire.
- L'Albien est caractérisé par un remarquable retour de la sédimentation terrigène. Cet étage regroupe la masse des sables et d'argiles comprise entre la barre aptienne et l'horizon argileux sus-jacent attribué au Cénomanien. On remarque que le changement de régime sédimentaire et l'arrivé en masse des sédiments détritiques s'est produit entre le Néocomien et le Barrémien et au cours de l'Albien, (Fabre, 1976).
- Le Cénomanien est formé par une alternance de bancs de dolomies, de calcaires dolomitiques, d'argiles et d'évaporites (anhydrite ou sel), son faciès varie:
- Au Sud de Ouargla, la dominance des argiles et des évaporites.
- Au Nord, au contraire, les bancs de calcaires et de dolomies sont très importants.
- De plus, l'épaisseur augmente du Sud vers le Nord, de 50 m dans le Tademaït à 350 m dans le bas Sahara.
- La présence de nombreux banc d'évaporites et d'argiles rendent le Cénomanien imperméable (Bel et Cuche, 1969).
- Le Cénomanien inférieur à moyen est argileux dans le Tinghert et le bas Sahara.

- Le Cénomanien supérieur est calcaire, (Busson, 1972).
- > Le Turonien: se présente sous trois faciès différents, du Sud au Nord:
- Au Sud du parallèle d'El Goléa, il est calcairo-marneux.
- Entre El Goléa et Djamaâ, il est essentiellement calcaire.
- Au Nord de Djamaâ, il est à nouveau calcairo-marneux. Son épaisseur moyenne varie entre 50 à 100 m. Elle augmente cependant dans la région des chotts où elle dépasse les 300 m (Bel et Cuche, 1969).
- > *Le Sénonien*: s'individualise en deux faciès:
- Le Sénonien inferieur, le Sénonien salifère et anhydritique à sédimentation lagunaire caractérisée par des formations argileuses et salifères à anhydrites, il est très peu perméable. (Busson, 1972).
- Le Sénonien supérieur représenté par le Sénonien carbonaté se caractérise par des formations carbonatées perméables.

III. 1.3. Le Cénozoïque

L'Eocène: On distingue deux ensembles différents du point de vue lithologique, à la base:

L'Eocène carbonaté est formé essentiellement par des dolomies et des calcaires dolomitiques avec quelques intercalations de marnes, d'argiles, d'anhydrites et des sels. La puissance de cette formation varie entre 100 et 500 m, l'épaisseur maximal se situe dans la zone du bas Sahara.

Au sommet:

L'Eocène évaporitique est formé par une alternance de calcaires, d'anhydrites et de marnes. Son épaisseur atteint une centaine de mètres sous les Chotts, (Bel et Cuche, 1969).

Le *Mio-Pliocène:* Le Tertiaire continental du Sahara peut être relativement épais, de 150 m. Il se présente sous forme d'un faciès sableux et argileux avec du gypse. Dans le bas Sahara, la sédimentation lacustre se présente sous forme de séries sableuses et argileuses connues sous le nom du Continental Terminal dont l'épaisseur peut atteindre dans la région des Chotts Algéro-Tunisien quelques centaines de mètres.

III. 2. La tectonique

Par opposition à l'Algérie du Nord considérée comme une zone a tectonique instable, complexe et mobile. Le Sud à savoir le Sahara est stable, monotone, consolidé depuis des centaines de millions d'années.

Selon les travaux géologiques menés dans la région en 1972, il semblait que les mouvements tectoniques dans le Sahara septentrional, soient assez anciens, car datées pour la plupart du secondaire et du tertiaire. (Fabre, 1976).

III. 2.1. Le grand accident sud Atlasique

Le socle Africain est limité au Nord par un immense accident tectonique d'une longueur de 1200km, s'allongeant d'Agadir au Golf de Gabes et à la tripolitaine. Il ne s'agit pas d'une grande faille unique, mais d'une série d'accidents se relayant de l'atlantique à la méditerranée. Cette flexure Saharienne n'est pas une faille hypocrustale et n'est soulignée par aucune venue volcanique. Cependant c'est une limite paléogéographique importante, la bordure réelle du continent Africain, la souligne de démarcation entre le socle Africain et la Berbérie méditerranéenne plissée. Ses rejeux récents, Plio-Quaternaire sont soulignés par une certaine séismicité, cas du tremblement de terre d'Agadir. (Furon, 1968).

Une phase orogénique plus récente datant de la fin du pliocène engendre des plissements dans la région Saharienne qui se sont traduit par le bombement qui plonge dans sa partie orientale sous les chotts. (Busson, 1972). Durant l'aire quaternaire, des oscillations importantes expliquent ainsi la présence des chotts et le relief du bas Sahara. (Fabre, 1976).

III. 3. La géomorphologie

Du point de vue géomorphologique, le village de M'rara se trouve à une altitude d'environ 100m, dans une cuvette à remplissage Plio-Quaternaire, d'environ 15km² entouré par des collines Mio-Pliocène. Ces derniers définissent dans l'ensemble une pente à regard Est. Les altitudes diminuent à mesure que l'on se déplace vers l'Est. (Guemache et al., 2008).

III. 3.1. La cuvette du bas Sahara

Le bas Sahara se confond presque avec le bassin versant théorique du chott Melghir, soient environ 700000km². Il est limité au Nord par l'Atlas saharien, à l'Ouest par la dorsal du M'zab, au Sud par les plateaux de Tadmait et du Tinghert, à l'Est par le revers du dahar Tuniso-libyen. (Ballais, 2010).

III. 3.2. La plate forme saharienne

La plate forme saharienne s'étend du pied de l'Atlas saharien jusqu'au frontière des pays voisins. Elle est essentiellement reconnue par des sondages pétrolier et elle est constituée d'un soubassement antécambrien métamorphique des terrains paléozoïques plus ou moins plissés, une couverture subhorizontale de dépôts secondaires et tertiaires auxquels s'ajoutent de vaste recouvrements superficiels : de sable, d'argile et de cailloutis quaternaire. (Alloul in Djidel, 2008).

III. 4. Géologie locale de M'rara

D'après la carte géologique de l'Algérie au 1/500000^e (Fig.08), la région de M'rara se caractérise par des formations d'âges tertiaire et quaternaire.



Fig. 08: Carte géologique de M'rara (Carte géologique de l'Algérie au 1/500000^e ; SCG. 1951).

Les affleurements de M'rara sont représentés du plus ancien au plus récent par :

- *Le Pontien (M_P)* : représente le passage Miocène-Pliocène, occupant la partie Ouest de la carte et entourant le village de M'rara.

- *Le Pliocène continental (P^C)* : se trouve plus à l'Ouest, composé de poudingue et de calcaire lacustre constituant tout le reste du terrain tertiaire. Ce sont des dépôts lacustres à forts étendus, formés de calcaire blanchâtre qui correspond à une carapace hamadienne, plus ou moins continue et épaisse. (S.C.G, 1951).

- Le Quaternaire continental (Q^T) : est formé d'alluvions anciens, de regs et de terrasses.

- Alluvions actuels (A) : comme les chott les sebkhas, et les croutes gypseuses et calcaires.

- Dunes récentes (D) : observable dans le sahara Algérien.

III. 4.1. Les logs stratigraphiques des forages hydrauliques de M'rara

Plus d'une dizaine de forages ont été réalisé afin d'exploiter les nappes aquifères. Concernant notre étude nous avons utilisé les forages suivants (Fig. 09): H_{10-42} , H_{10-49} , H_{10-70} , M'rara104, M'rara105. Leurs principales caractéristiques sont résumées dans le (Tab. 03) :

Formagas	Les	s coordonnées (GPS	Profondours(m)	Année de
rotages	Х	Y	Z Z(m) Protondeurs(réalisation
H ₁₀₋₄₂	5°40'00''	33°28'00''	113	1560	1960
H ₁₀₋₄₉	5°38'45''	33°24'56''	147,25	2890	1959
H10-70	5°42'35''	33°27'11''	121,71	1600	1974
M'rara104	5°38'56''	33°29'00''	110	1800	1988
M'rara105	5°37'48''	33°28'14''	121	1800	1988

Tab.03 : Inventaire des forages utilisés dans le secteur d'étude. (A.N.R.H. Ouargla.)



Fig.09 : Carte d'inventaire des forages utilisés dans notre étude. (Google Earth)

		H_{10-42}			
X:747825	5 m				
Y : 3706205 m <u>Date des travaux : 196</u>					
Z : 113 m					
Profondeur	Lithologie	Description lithologique	Etage		
0		Argile et sable	Mio-pliocène		
200-		Perte totale Marne et calcaire dolomitique à gypse et anhydrite	Eocène		
400-		Marne, anhydrite, dolomie calcaire et calcaire dolomitique	Sénonien supérieur		
600-	636				
800-		Anhydrite massive et gypse avec Intercalations dolomitique et marneuse	Sénonien inférieur		
-	836 970	Couche de sel massif de 11m			
1 000		Calcaire marneux, et marne plastique	Turonien		
1 200-	1226	Anhydrite massive, avec intercalation de marnes dolomitiques gris-vert	Cénomanien		
	1312	Dolomie grise et jaune, argile gris- vert	Vraconien		
1 400-	1480	Sable et grés à grains fin Argile sableuse	Albien		

Fig. 10 : Colonne stratigraphique du forage H_{10-42} .

H ₁₀₋₄₉						
X: 746032	X : 746032 m X : 2700487 m					
$\mathbf{Z} \cdot 127.25$	m	Date des tr	<u>ravaux : 1939</u>			
Profondeur	Lithologie	Description lithologique	Etage			
	86	Sable, calcaire lacustre à la base	Mio-pliocène			
_		Calcaire et gypse	Eocène			
200-	417	Calcaire dolomitique avec anhydrite de 230 à 310	Sénonien sup			
400- 600- 800-		Anhydrite, calcaire dolomitique et marne	Sénonien inf			
1 000-	979	Calcaire marneux gris-blanc	Turonien			
1 200-	1025	Argile, marne et anhydrite	Cénomanien			
-	1313	Dolomie, calcaire et argile	Vraconien			
1 400-	1482	Argile sableuse et grés	Albien			



H ₁₀₋₇₀					
X:751866	m		1074		
Y: 3704799 m <u>Date des travaux : 197</u>					
<i>L</i> .121,/1	111				
Profondeur	Lithologie	Description lithologique	Etage		
0	75	Sable et grés argileux	Mio-pliocène		
200-		Marne blanche à intercalation de calcaire marneux dolomitique	Eocène		
400-	496	Alternance de calcaire marneux à gypse et des marnes à anhydrite	Sénonien Supérieur		
600- 800-		Dolomie et marne blanche à anhydrite	Sénonien Inférieur		
1 000-		Calcaire marneux brun et marne grise à anhydrite	Turonien		
1 200-	1236	Argile et marne dolomitique localement à anhydrite	Cénomanien		
-		Marne dolomitique et calcaire	Vraconien		
1 400-	1347	Argiles et grés	Albien		
1 600-	1000				



Т.

1

M'rara ₁₀₄					
X : 746125 m					
Y:370801	2 m	<u>Date des travaux : 1988</u>			
Z:110 m					
Profondeur	Lithologie	Description lithologique	Ftage		
07		Description innoiogique	Etage		
200-	208	Sable et grés argileux	Mio-pliocène		
400- 600-	647	Calcaire dolomitique	Sénonien sup		
800-	962	Marne grise et rouge à anhydrite	Sénonien inf		
1 000-		Calcaire marneux brun, marne grise	Turonien		
1 200-	1232	Argile et marne dolomitique localement à anhydrite	Cénomanien		
		Calcaire et marne dolomitique	Vraconien		
1 400-	1489	Argile versi-colore, sable et grés à grains fins	Albien		

Fig. 13 : Colonne stratigraphique du forage M'rara 104.

M'rara 105					
X : 744405 m V : 3706550 m Date des travaux : 1988					
Z : 121 m		Duie des il	ичиил : 1700		
					
Profondeur	Lithologie	Description lithologique	Etage		
	200	Sable et grés argileux	Mio-pliocène		
200-		Marma à armaa at anhudrita	Eocène		
600-			et Sénonien inférieur		
- 800 - 1 000-		Marne grise et rouge à anhydrite	Sénonien inférieur		
		Calcaire marneux brun, marne grise à anhydrite	Turonien		
1 200-		Argile et marne dolomitique localement à anhydrite	Cénomanien		
-	1300	Calcaire et marne dolomitique	Vraconien		
1 400-	1440	Argile versicolore, sable et grés à grains fins	Albien		

Fig. 14 : Colonne stratigraphique du forage M'rara 105.

III. 4.2. L'analyse Stratigraphique des forages hydrauliques

La série stratigraphique révélée par les forages réalisés dans et autour la région de M'rara montre succinctement une lithologie de bas en haut :

Albien est caractérisé par une grande épaisseur qui varie de 140 m à M'rara₁₀₅ jusqu'à 253 m à H_{10-70} , il est marqué essentiellement par des formations détritiques ou on trouve des grés des sables et des argiles.

Vraconien est caractérisé par une épaisseur moins épaisse que celle de l'albien qui varie de 80 m, à M'rara₁₀₄, jusqu'à 111 m à H_{10-70} , il est marqué par des formations carbonatées ; des calcaires, des dolomies, des marnes dolomitiques, des calcaires dolomitiques et parfois des argiles

Cénomanien est constitué surtout par des formations argileuses dolomitiques, on trouve parfois des marnes et de l'anhydrite massives. Son épaisseur varie entre 99 m à M'rara₁₀₅ et 202 m à M'rara₁₀₄.

Turonien est marqué surtout par l'abondance du calcaire marneux, parfois on trouve des calcaires dolomitiques et des marnes. Son épaisseur varie entre 46 m à H_{10-49} et 160m à H_{10-70} .

Sénonien est subdivisé en deux sous étages de bas en haut on trouve :

Sénonien inferieur (Sénonien lagunaire) est marqué essentiellement par des évaporites ; de l'anhydrite parfois massive avec du gypse et quelques passé de sel. On note aussi la présence des dolomies et de marnes. Son épaisseur varie entre 315 m à M'rara₁₀₄ et 562 m à H_{10-49} .

Sénonien supérieur (Sénonien carbonaté) est composé principalement par des formations carbonatées ; des calcaires dolomitiques, des marnes, parois des anhydrites et des gypses. Son épaisseur varie entre 0 m à M'rara₁₀₅, 238 m à H_{10-49} et 401 m à H_{10-42} .

La limite entre l'Albien et le Sénonien lagunaire est remarquablement épaisse car elle est formée par la succession de trois étages ; le Vraconien, le Cénomanien, le Turonien qui contiennent des formations imperméables des argiles, des marnes et des calcaires. Crainte que les eaux de l'Albien ne remontent et engendrent de grandes dissolutions des évaporites du Sénonien supérieur.

Eocène est formé essentiellement par des formations carbonatées ; des marnes des calcaires dolomitiques parfois à gypse et anhydrite. Son épaisseur varie entre 0 m à M'rara₁₀₄, 93 m à H₁₀₋₄₉, et 460 m à M'rara₁₀₅.

Mio-Pliocène est composé principalement par des formations détritiques ; des sables, des argiles et des grès argileux, on note aussi la présence des gypses sous forme des lentilles. Son épaisseur varie entre 75 m à H_{10-70} et 298 m à M'rara₁₀₄.

III. 4.2. Le forage H₁₀₋₄₂

Le forage H_{10-42} , a été réalisé en 1960 par la COMAFOR pour exploiter la nappe albienne et alimenter le village de M'rara en eau potable et d'irrigation. Le forage a commencé à débité

1200 litres par minute d'eau salée. Après une dizaine d'année d'exploitation, suite à quoi, il a été procédé par la SONATRACH à l'obturation du forage avec un bouchon de ciment.

- Le forage a subi une perte totale à une profondeur de 90 mètres au niveau des formations carbonatées de l'éocène.

- Le forage se caractérise par la présence d'une couche de sel massif à une profondeur de 930 mètres.

III. 5. Géologie locale de Tafziouine

L'étude géologique de la région permet de constater l'existence d'affleurements secondaires, représenté par le crétacé supérieur, qui occupe la zone de Bled Bouaicha au Nord Ouest de Guerrara.

La dépression de Guerrara est creusée dans un dépôt du continental terminal daté de Pontien, le dépôt est connu au nom du Mio-pliocène. Ce sont des formations détritiques récentes, qui occupent les dépressions de l'atlas Saharien et qui s'étendent largement au Sud.

Le pliocène continental constitue tout le reste des terrains tertiaires, qui sont des dépôts lacustres formés de calcaire blanchâtre.

Le Quaternaire continentale présente des formations sédimentaires spécifiquement Sahariennes (alluvions quaternaires fluviatiles). (S.C.G., 1951).

III. 6. Géologie locale de Mansourah

Dans la région de Sahb-Elbir affleurent des calcaires à silex attribués au sénonien carbonaté supérieure recouvert par des dépôts sableux du Mio-pliocène. A quelques mètres du lieu de l'effondrement, on observe un conglomérat à ciment carbonaté, les éléments sont assez grands (jusqu'à 10cm) et sont constitués essentiellement de calcaires et de silex. Au niveau de l'effondrement, nous n'avons pas réussi à nous approcher des parois du gouffre, cependant, on peut voire un niveau sableux stratifié discordant sur un conglomérat de plusieurs mètres d'épaisseur. En profondeur apparaissent des dalles calcaires attribuées au sénonien carbonaté. (Hamis et al., 1995).

De point de vue tectonique, contrairement à ce qui a été avancé par les hydrogéologues du service hydrogéologique de Hassi-Messaoud qui n'ont détecté aucun accident, nous avons observé plusieurs failles à quelques mètres de l'effondrement. Ces failles affectent les conglomérats et présentent deux directions majeures connues dans la région. Ce sont des failles de direction E-W et N-S. Ces accidents facilitent et favorisent la circulation des eaux souterraines et de surface. Ils contribuent de ce fait certainement à l'élargissement de l'effondrement. (Hamis et al, 1995).

Les ressources hydriques

IV. 1. Introduction

Le système aquifère du Sahara septentrional (S.A.A.S) s'étend sur une vaste zone, dont les limites sont situées en Algérie, la Tunisie, et la Libye. Le domaine du SAAS (Fig.15), couvre une superficie d'environ1000000 km2 de sorte que 70% se trouve en Algérie, 24% en Libye, et 6% en Tunisie. Il s'étend du Nord au Sud depuis l'Atlas Saharien jusqu'aux affleurements du Tidikelt et du rebord méridional du Tinghert, et d'Ouest en Est Depuis la vallée du Guir-Saoura jusqu'au graben de Hun en Libye. (UNESCO, 1972).

Généralement, le grand bassin sédimentaire du Sahara septentrional contient trois principaux aquifères :

- A la base: la nappe du continental intercalaire ; l'un des plus grands réservoirs captif du monde,

- Au milieu : la nappe du complexe terminal ; c'est un ensemble assez homogène incluant des formations carbonatées du crétacé supérieur et des épisodes détritiques du tertiaire ;

- Au sommet : les nappes phréatiques. (UNESCO, 1972).



Fig. 15: Coupe hydrogéologique du système aquifère; le continental intercalaire

Et le complexe terminal. (UNESCO, 1972).

IV. 2. La nappe du continentale intercalaire

Le réservoir du continental intercalaire est contenu dans les formations continentales du crétacé supérieur (Barrémien et Albien), composé essentiellement de grés, de sables et d'argiles. Le réservoir s'étend sur environ 600000km², il est continu du Nord au Sud depuis l'Atlas Saharien jusqu'au Tassili et le Hoggar, d'Ouest en Est depuis la vallée de la Saoura jusqu'au désert Libyen. Au Nord Est de la dorsal du M'zab, le toit de l'aquifère constitue d'argiles et d'évaporites du Cénomanien continu sur tout le bassin.

La profondeur augmente du Sud au Nord, de 1000m au bas Sahara, à 2000m sur les chotts provoquant ainsi une forte charge de la nappe sur tout le bassin oriental. Le substratum est constitué des formations argilo-sableuses et argileuses ou carbonatées d'âge de plus en plus récent du Sud vers le Nord.

La carte piézométrique établie lors de l'étude « E.R.E.S.S. » en 1972, montre que cette partie orientale de l'aquifère est alimenté par :

- Le piedmont Sud Atlasique au Nord Ouest de Laghouat;
- Le plateau du Tinghert ;
- Le plateau du Dahar (Tunisie). (UNESCO, 1972).

IV. 3. La nappe du complexe terminal

Le système aquifère du complexe terminal couvre la majeure partie du bassin oriental du Sahara septentrional (Fig. 16), sur environ 3500000 km². Cette nappe peut circuler dans l'une ou encore dans les deux formations litho stratigraphiques suivantes :

- Le Sénonien et l'éocène carbonaté ;
- Le Mio- pliocène sableux.



Fig. 16: Coupe hydrogéologique transversale du complexe terminal. (UNESCO, 1972).

L'allure des isopièses montre que la nappe peut être alimentée par les zones de bordures suivantes :

- Alimentation à partir de l'Atlas Saharien par deux origines ;
- La flexure Sud Atlasique ;
- Par infiltration des crues des Oueds à l'aval de l'accident Atlasique.

- Alimentation par le plateau du Tademaït et Tinghert à partir de la zone des chotts Melghir et Merouane.

- Alimentation par les monts de M'zab lors des crues exceptionnelles. (UNESCO, 1972).

IV. 4. La nappe superficielle

Les nappes superficielles sont partout présentent au Sahara et se situent généralement dans les zones de dépressions ou les vallées, elles sont alimentées par les pluies, les crues, les eaux de drainages et aussi très souvent par les remontées naturelles des eaux.

Ces ressources superficielles sont importantes dans tout le Sahara. Elles permettent d'irriguer les petites palmeraies, les jardins légumiers et d'abreuver les troupeaux et leurs propriétaires.Les profondeurs des nappes dites libres au Sahara varient entre 1 et 60m, sauf dans les régions de Zibans, ou elles peuvent atteindre les 150m, le résidu sec est très variable selon les zones. (Zemmouri et al, 1994).

La karstification

V. 1. Définition

La Karstification, c'est la dissolution des roches qui conduit à l'élargissement des fissures, puis à la création des cavités importantes. (Parriaux, 2009).

La Karstification correspond à l'ensemble des processus de genèse et d'évolution des formes superficielles et souterraines dans une région Karstique, (Geze, 1973). Or, un des problèmes concernant la Karstification est celui de la vitesse de développement du réseau de drainage établi dans la zone non saturé. Ce problème correspond à l'évaluation de l'intensité de la dissolution dont le système Karstique est le siège. (Mathevet, 2002).

V. 2. Processus de karstification

La Karstification est conditionnée par deux facteurs (Fig.17) :

V. 2.1. Le potentiel de la Karstification : il est lié à

V. 2.1.1. L'existante d'un solvant

La dissolution de la roche est fonction de la solubilité des minéraux qui la compose. (Valois, 2008).

V. 2.1.2 L'existante d'un gradient hydraulique : il est représenté entre la zone de recharge et le niveau de base.

Ce gradient est le moteur de la dissolution, car il permet l'évacuation des matières dissoutes, ainsi que le renouvellement de l'eau. Il est contrôlé soit par les mouvements tectoniques, soit par les variations eustatiques.



Fig. 17 : Représentation d'un système karstique (Mangin, 1994).

V. 2.2. L'état initial du massif : elle est représenté par la nature lithologique des matériaux, la porosité initiale existante et aussi le l'état de la fracturation. (Valois, 2008).

V. 3. Les diverses approches du Karst

Le karst est une région du Sud de la Slovénie, composée de plateaux calcaires ou l'eau s'infiltre en réseaux souterrains. (Fauchard et al., 2004).

Les milieux Karstiques sont des milieux originaux, qui ont été principalement étudiés selon trois approches qui sont la Géomorphologie, Spéléologie et l'hydrogéologie.

V. 3.1. L'approche Géomorphologique

Tout d'abord, l'approche géomorphologique, est basée sur l'étude des paramètres géographiques tels que le climat et la morphologie, qui permettent de décrire la formation des Karsts et leurs évolutions. Cette approche est principalement basée sur la description des formes de surfaces, les exokarsts. Elle s'appuie sur deux grandes théories pour expliquer la Karstogénèse, l'une basée sur des cycles d'érosion, l'autre basée sur une théorie climatique de la Karstification (Corbel, 1957 in Mathevet, 2002). Cependant, l'approche géomorphologique reste limitée, d'une part, elle ne prend pas en compte les phénomènes physiques qui permettent d'expliquer la formation et l'organisation des Karsts, d'autre part, elle reste éloignée des objectifs de l'hydrogéologie. (Mathevet, 2002).

V. 3.2. L'approche spéléologique

L'approche spéléologique est basée et se limite sur la description des formes souterraines telles que l'endokarst, les cavernes et les réseaux pénétrables par l'homme. Les principales limites de cette vision de karst sont que des observations dans les grottes et ne peuvent pas être généralisées à un massif karstique, et que les seules ressources en eau se limitent aux lacs et les rivières souterraines. Cependant, les observations spéléologiques peuvent fournir de bonnes informations sur la karstification, lorsqu'elles sont replacées dans un contexte hydrogéologique. (Mathevet, 2002).

V. 3.3. L'approche hydrogéologique

L'approche hydrogéologique s'appuie sur la relation fondamentale entre les écoulements et la karstification, qui permet d'expliquer l'organisation et la hiérarchisation des vides (Mangin, 1975 in Mathevet, 2002). Pour les ressources en eau, cette approche s'oppose aux seules rivières souterraines et fait appel à la notion d'aquifère. (Mathevet, 2002).

V. 4. Les cavités souterraines

Les cavités rencontrées habituellement dans le domaine du génie civil sont les carrières souterraines, les mines peu profondes et les cavités naturelles de dissolution. On notera que les matériaux les plus fréquemment exploités en carrières en dehors du sable, de l'argile, ou de l'ardoise, sont des roches solubles susceptibles de donner dans certains cas des cavités naturelles. Il s'agit des roches carbonatées comme les calcaires et les craies utilisés pour la pierre à bâtir, la chaux ou le ciment et des roches évaporitiques essentiellement les gypses exploités pour le plâtre. (Fauchard et al., 2004).

Les cavités souterraines rencontrées peuvent être d'origine naturelle ou anthropique.

V. 4.1. Les cavités naturelles

Par extension, toutes les formes de dissolution rencontrées dans les roches sédimentaires carbonatés et évaporitiques, sont appelées karsts. (Fauchard et al., 2004). Lorsque le contexte hydrogéologique est favorable, la circulation de l'eau souterraine peut provoquer la dissolution des carbonates et des sulfates, il peut alors se former des poches de dissolution ou des cavités karstiques. (Ek, 2006).

V. 4.1.1. Les cavités naturelles en milieu carbonaté

Dans les carbonates, dont la solubilité est de l'ordre de 12 mg/l à 20°c, la circulation de l'eau élargit progressivement les conduits naturels tels que les joints de stratification, les failles et les diaclases et crée un réseau souterrain de galeries, et de puits. Ces processus sont relativement lents et ne sont pas observables à l'échelle humaine. (Fauchard et al., 2004).

V. 4.1.2. Les cavités naturelles en milieu sulfaté

Dans le gypse, roche sulfatée la plus commune, qui présente une solubilité de l'ordre de 2,5 g/l à 20°c. La formation d'un réseau karstique conséquent peut être rapide à l'inverse de ce qui se passe dans les carbonates. (Fauchard et al., 2004).

Le gypse et l'anhydrite sont très solubles dans l'eau, pourtant on ne trouve des pores de dissolution que dans les gypses. En effet dans l'anhydrite, l'eau entrant en contact avec une fissure va contribuer par gonflement au scellement de la fissure.

Au contraire, dans le gypse une fissure s'agrandit pour former des cavités de grande taille, c'est une karstification. Le gypse est donc un aquifère très perméable, mais les eaux qu'il conduit ont une forte minéralisation en CaS_{04} . (Parriaux, 2009).

V. 4.2. Les cavités anthropiques

Il s'agit de cavités creusées par l'homme, soit pour extraire des matériaux, soit pour s'abriter de danger divers comme les abris, soit pour des besoins militaires ou stratégiques tel que les sapes.

Dans tout les cas, ces ouvrages souterrains se situent à faible profondeur (de 2 à 30 m). Ils sont plus ou moins importants, mais présentent les mêmes risques d'effondrement. (Ek, 2006)

V. 5. Les risques liés à la présence de cavités

Les instabilités de cavités souterraines génèrent des désordres qui peuvent se propager jusqu'à la surface. Les conséquences peuvent être très graves, les ruines de constructions des ouvrages de génie civil et les morts des hommes en cas des phénomènes brutaux.

Il ya une graduation dans la gravité des problèmes de surface engendré par les effondrements, depuis l'affaissement, jusqu'à l'effondrement généralisé, en passant par la monté d'un fontis

Au jour et l'effondrement localisé. (Fauchard et al., 2004)

Affaissements et effondrements

VI. 1. Les mouvements de terrains

Les mouvements gravitaires des terrains, sont des événements qui peuvent être très lents ou extrêmement rapide, plus ou moins spectaculaire, souvent dommageable et parfois dangereux. (Martin, 2007).

Les mouvements de terrains correspondent à des processus naturels qui participent largement au même titre que l'érosion au façonnement et à l'évolution des paysages. (Gilli et al., 2008).

VI. 2. Les facteurs intervenant dans les processus d'instabilité

Les facteurs qui régissent ces phénomènes sont généralement multiples :

VI. 2.1. Action et influence de l'eau

La variation des conditions hydrauliques, est l'une des principales causes des mouvements de terrains. (Lebourg, 2000).

VI. 2.1.1. Alimentation en eau des terrains

Une grande partie de l'alimentation en eau du sol provient des précipitations, tandis que l'autre partie provient des réseaux hydrauliques souterrains.

Suivant le mode de précipitation, différents répartitions de l'eau dans le sol apparaissent. L'eau humidifie le sol, puis s'il y'en a suffisamment s'infiltre et enfin, ruisselle à la surface. (Lebourg, 2000).

VI. 2.1.2. La rupture de l'équilibre

La rupture de l'équilibre est souvent due à l'augmentation de la pression interstitielle, qui diminue la résistance au frottement. De même, la saturation en eau d'un sol peut sous l'effet de vibration entrainer la liquéfaction du sol. (Lebourg, 2000).

VI. 2.2. Action de la pesanteur

L'action de la pesanteur est le moteur principal du mouvement. La stabilité d'un bloc est donnée par le rapport entre les forces stabilisantes et les forces déstabilisantes. On parle du facteur de sécurité (F_s). Si celui-ci est inférieur à 1, il ya rupture de l'équilibre, et s'il est supérieur à 1, il ya conservation de l'équilibre. (Lebourg, 2000).

VI. 2.3. Action anthropique

Les interventions de l'homme peuvent aussi aggraver la situation dans des sites sensibles, ou générer de véritables instabilités d'origine anthropique, à l'occasion d'aménagements inadaptés, ayant souvent mal pris en compte les diverses composantes du milieu naturel. (Lebourg, 2000).

VI. 3. Les affaissements et les effondrements

VI. 3.1. Caractérisation

Ces phénomènes naturels correspondent à des mouvements verticaux du sol, induit par l'existence de vides en profondeur. Ils résultent exclusivement de la circulation souterraine,

évidant le sous-sol par dissolution de roches solubles, ou par entrainement mécanique et hydraulique de matériaux fins. La genèse ou l'évolution de ces processus peut en outre être commandée ou aggravée par des actions humaines.

L'existence d'un vide en profondeur, entraine une redistribution des contraintes à sa périphérie et crée en particulier des efforts de traction et de cisaillement dans les terrains de couverture, c'est le phénomène de détente. L'accroissement des contraintes verticales et le lessivage des terres éboulées entretiennent le mécanisme qui évolue progressivement de manière ascendante. Dans certains cas, sa progression est stoppée par un auto-colmatage des vides c'est-à-dire le cas de foisonnement des terrains foudroyés ou des remblais hydrauliques.

Mais, il est fréquent qu'elle atteigne la surface du sol, ou elle provoque des affaissements ou des effondrements. (Gilli et al., 2008).

VI. 3.2. Les affaissements

Se sont des déformations souples qui résultent d'un tassement progressif et lent, des terrains de recouvrements par fermeture des vides sous-jacente. Les affaissements se manifestent par la formation d'une cuvette en surface de faible profondeur (Fig.18).

Ils se produisent généralement suite à l'effondrement d'une exploitation à grande profondeur. Ils sont essentiellement dommageables pour les habitations et les infrastructures. (Fauchard et al., 2004).



Fig. 18: Affaissement sur une ancienne mine de charbon. (Fauchard et al., 2004).

VI. 3.3. Les effondrements

D'une façon générale, l'effondrement peut être défini comme un phénomène caractérisé par la réduction de volume du sol due à l'effondrement structural, dont la vitesse dépend de la façon selon laquelle les facteurs qui l'organisent ont lieu. Ce phénomène est fréquemment associé à des variations de l'état de contraintes internes et externes existant sur le sol. Ces variations peuvent être dues à l'augmentation de la teneur en eau, ou chargement du sol, ou simplement à des modifications de l'état de contraintes à l'intérieur du sol. (Cardoso et al.).

Il ya une gradation dans la gravité des problèmes de surface engendrés par les effondrements, depuis l'affaissement jusqu'à l'effondrement généralisé en passant par la montée d'un fontis au jour et l'effondrement localisé.

VI. 3.3.1. Les montées de fontis au jour

Les montées de fontis au jour résultent d'une rupture du toit de la cavité qui débouche en surface, en créant un entonnoir de quelques mètres à quelques dizaines de mètres de diamètre. Ce phénomène peut mettre plusieurs dizaines d'années avant d'atteindre la surface, mais la rupture finale est généralement brutale. Le risque de montée au jour d'un fontis dépend du diamètre et de la hauteur des cavités, comme de l'épaisseur et de la nature du terrain de recouvrement, ainsi que des conditions météorologiques.

Les fontis nés de l'effondrement de cavités naturelles, se cantonnent préférentiellement aux terrains gypsifères (Fig. 19). La taille des fontis peut atteindre 100 m de diamètre.

En terrain calcaire, le réseau de karst est généralement stable en raison de bonnes caractéristiques mécaniques du matériau. Les effondrements peuvent cependant avoir lieu, si la cavité est proche de la surface, si une surcharge pondérale est appliquée au- dessus d'elle ou en cas de vieillissement accéléré (fuite de réseau, trafic,). (Fauchard et al., 2004).



Fig. 19: Fontis sur carrière de gypse du Trias provençal.

(Fauchard et al., 2004).

VI. 3.3.2. Les effondrements localisés

Les effondrements localisés sont une variante des montées de fontis, car ils naissent de la rupture de plusieurs piliers, ce qui a pour conséquence de provoquer en surface une zone d'effondrement d'un diamètre supérieur à celui d'un simple fontis. (Fauchard et al., 2004).

VI. 3.3.3. Les effondrements généralisés

Ce sont des effondrements brutaux qui peuvent affecter des superficies de quelques mètres carrés à plusieurs hectares.

VI. 4. Les causes des affaissements et des effondrements

L'aléa affaissement – effondrement est influencé par deux types de paramètres :

VI. 4.1. Les paramètres naturels

VI. 4.1.1. Effet de suffosion

La suffosion est un processus géologique dangereux résulté d'écoulement de l'eau souterraine. Les effets de suffosion sont bien connus (renard, érosion souterraine) dans le monde, comme les ruptures d'un sol ou de la roche composée des débris cimentés par la matière dissoluble. Finalement, les manifestations de suffosion suivants ont formées ; cavités, affaissements, effondrements. (Khomenko, 2006).

VI. 4.1.2. Effet de dissolution

Les principales roches solubles sujettes à de tels mécanismes, présentent des solubilités très variables, c'est essentiellement la vitesse d'évolution des phénomènes qui les distingue, car le processus général de création des réseaux souterrains reste comparable, avec une action initiale par dissolution le long des fissures permettant l'infiltration de l'eau suivie d'une participation accrue de l'action mécanique des eaux, au fur et à mesure de l'élargissement des conduits. (Gilli et al., 2008).

VI. 4.2. L'impact des actions humaines

VI. 4.2.1. La mise en solution

Ce problème concerne essentiellement les gisements profonds de substances très solubles comme le sel gemme qui après injection de l'eau en forage, sont exploités par pompage sous forme de saumures, créant des vides résiduels importants. Les conséquences superficielles peuvent parfois être beaucoup plus graves. (Gilli et al., 2008).

VI. 4.2.2. La réactivation de circulation karstique

Les pompages prolongés dans une nappe karstique peuvent perturber notablement son régime hydraulique, lorsqu'ils génèrent des rabattements importants. Le déséquilibre résultant en partie lié à un accroissement des vitesses de circulation dans les axes de drainages et à un renouvellement accru de la nappe par des eaux agressives, peut s'accompagner d'une reprise de la dissolution.

La surexploitation des nappes karstiques s'accompagne également de dégradation superficielle de plus en plus fréquente. (Gilli et al., 2008).

VI. 4.2.3. Le lessivage de remplissages meubles

Dans ce cas, c'est la circulation d'eau dans des matériaux meubles, qui peut entrainer les éléments fins et évider localement le terrain. Ses effets peuvent alors être plus importants et plus rapide par vidange brutale de remplissages préexistants. Soit le débourbage d'anciens conduits au sein du massif, soit le soutirage des dépôts qui fossilisent l'ancienne surface topographique. (Gilli et al., 2008).

Méthodologie d'étude

I.1. Introduction

Le diagnostic des effondrements qui affectent le Sahara septentrional dont M'rara est la région la plus touché a été fait suivant une méthodologie d'étude et d'analyse qui comporte les étapes suivantes :

- La reconnaissance préliminaire ;
- Les travaux de terrain ;
- Les analyses aux laboratoires ;
- Etude hydrologique.

I.2. La reconnaissance préliminaire

Une étude préliminaire de quatre phases a été effectuée.

I.2.1. L'étude géologique

La reconnaissance géologique est placée très en amont et consiste à obtenir toutes les informations relative aux caractéristiques du sol et du sous sol.

Pour la bonne compréhension de la partie géologique on a consulté :

- ➤ La carte géologique de l'Algérie au 1/500 000^e et toutes la documentation existante ;
- Les logs stratigraphiques des forages hydrauliques, qui peuvent nous renseigner sur la profondeur d'éventuelles cavités ;

I.2.2. La recherche d'archives et d'informations

On a effectué une recherche approfondi sur les archives par:

- L'étude de la toponymie de la région de M'rara, sur une carte topographique de l'Afrique au 1/50000^e, Feuille de Ghardaïa.
- La consultation d'archives, des mémoires et des rapports d'études en géologie, en géophysique et en hydrologie.

I.2.3. Enquête orale

Notre travail a été basé sur les témoignages de la population locale et les agriculteurs.

I.2.4. Recensement des effondrements et la recherche des indices de surfaces

Un balayage dans la région de M'rara nous a permet de chercher et de recenser les effondrements, les affaissements et les fissures existantes.

I.3. Les travaux de terrain

Sur le terrain, on a réalisé des coupes géologiques avec un échantillonnage au niveau des effondrements, avec la prise des photos et enfin nous avons effectué une étude géophysique.

I.3.1. Les coupes géologiques

Afin de bien étudier et suivre la succession litho stratigraphique, on a réalisé plusieurs coupes géologiques de surface, de profondeur et au alentour de la région d'étude.

I.3.2. Les photos

La prise des photos est indispensable pour montrer la nature du terrain et la géométrie des effondrements

I.3.3. L'échantillonnage

Un échantillonnage systématique a été fait au niveau des différentes couches des effondrements pour les sols. Pour les eaux on a pris trois (03) échantillons de la nappe phréatique et un (01) échantillon pour la crue de Oued R'tem.

I.3.4. L'étude géophysique

Pour pouvoir définir globalement les caractéristiques lithologique et géométrique des différentes couches géologiques composant la cuvette de M'rara, on a effectué une étude géophysique basée sur une technique appelée Imagerie électrique, qui repose sur la mesure d'une différence de potentiel et d'un courant entre deux électrodes implantées dans le sol afin de calculer la résistivité électrique du terrain.

II.3. Principe de travail sur le terrain

Notre travail a été effectué autour de l'effondrement N°04, (Fig. 20). Ce dernier a été entouré par quatre profils d'investigation. Deux profils orientés Est-Ouest et deux profils orientés Nord-Sud



Fig. 20 : Situation des profils électriques par rapport à l'effondrement

- Le terrain étant plat ce qui nous a permis de suivre un maillage régulier,

- La distance entre chaque deux piquets est de 5mètres, sur une longueur de 160mètres, ce qui nous a permet de parcourir une profondeur de 37.5mètres,

- Les coordonnées des points de mesure sont relevées en utilisant un GPS,

- La distance entre chaque deux profils Est-Ouest et Nord-Sud est estimé de 50 mètres

I.4. Les Analyses aux laboratoires

Aux laboratoires on a procédé à l'application d'une série d'analyses aux échantillons de sol prélevés des parois des effondrements prélevés :

I.4.1. Analyses chimiques

Les analyses chimiques des échantillons du sol, ont été effectuées afin de savoir ;

- ➤ La teneur en gypse ;
- ➢ La teneur en carbonate ;

➢ Le pourcentage des insolubles.

I.4.2. Analyses minéralogiques

Afin de savoir la composition minéralogique caractérisant les terrains de M'rara, on a effectué l'analyse minéralogique par deux méthodes :

- > Analyse pétrographique par la confection des lames minces ;
- Analyse aux rayons X

I.4.3. L' hydrochimie

Les analyses ont été effectuées au laboratoire du l'ANRH d'Ouargla. Trois (03) échantillons de la nappe phréatique et un(01) échantillon pour la crue d'Oued R'tem (**Tab. 04, Fig.21**) ont été prélevés dans des bouteilles en plastique destinés aux analyses physico-chimiques pendant la période allant de 30 Avril 2011.

Tab.04 : Les cordonnées et le niveau piézométrique de chaque puits artisanal de la région deM'Rara.

Les puits artisanaux	Les cord	onnées	Le niveau piézométrique	
Les puits artisanaux	Х	Y	(m)	
1 ^{ere} puits	5°38'12''	33°31'10''	72.9	
2 ^{eme} puits	5°29'33''	33°31'49''	71.6	
3 ^{eme} puits	5°21'59''	33°35'24''	69.2	



Fig.21: Carte d'inventaire des puits artisanales de la région de M'Rara.

I.5. Etude hydrologique : Dans le travail effectué, nous nous sommes basés sur une étude hydrologique, où on a fait le calcul des débits maximaux des crues qu'a connu la région de M'rara depuis 40 ans.
<u>Résultats et interprétations</u>

Diagnostic des effondrements

I. 1. Diagnostic des effondrements caractérisant la région de M'rara

I. 1.1. Introduction

Les plus importantes observations faites sur le terrain de M'rara sont résumées sur les problèmes des effondrements, des affaissements, des bétoires et des fissures (**Tab. 05**). Leurs situations sont faites par rapport au forage hydraulique H_{10-42} , qui est choisit comme un repère. (**Fig. 22**).

Tab. 05 : Les coordonnés géographiques des effondrements et des indices de surface

Les observations de	Coordonnées GPS					
surface	Latitude	Longitude				
Effondrement n° 01	33°28'38.3''	5°39'52.4''				
Effondrement n° 02	33°28'57.8''	5°39'06.9''				
Effondrement n° 03	33°28' 38.70''	5°39'49.74''				
Effondrement n° 04	33° 28'19.79''	5° 41'1.35''				
Affaissement	33°28'36.8''	5°39'49.0''				
Bétoire	33°28'40.4''	5°39'58.3''				
Fissure	33°28'17.0''	5°39'29.2''				

Observée sur le terrain.



Fig. 22 : Carte d'inventaire des effondrements et des indices De surfaces Observés sur le terrain. (Google Earth).

I. 1.2. Les effondrements

I. 1.2.1. L'effondrement N°01

L'effondrement 01, (Fig. 23) est situé au Nord- Est du forage H_{10-42} , à une distance de 117m environ, dont la date exacte de son apparition n'est pas encore connue.

A cause du remblaiement du coté Sud de cet effondrement, qui a en partie entravé son analyse, on a pu accéder par difficulté à la partie dégagée de la cavité ou on a fait les observations suivantes :

L'orifice est de forme elliptique, orienté selon la direction N80°, avec 25m de longueur sur 20m de largeur. Il constitue l'ouverture d'une cavité globulaire ovale et profonde d'environ 18m.

Du point de vue lithologique, la paroi interne de l'effondrement montre de bas en haut la succession lithologique suivante :

Couche de sable argilo-gypsifère, rougeâtre, peu consolidé, constitue de sables, d'argiles, de limons et de gypses, de 5 m d'épaisseur.

La formation est affectée par de nombreuses fissures, d'ordres métriques, dont la largeur d'ouverture est observable.

Couche de conglomérat, blanchâtre, monogénique, très peu consolidé, de 6m d'épaisseur, comprenant des galets de calcaires arrondis à ciment argileux sableux fin.

L'analyse des galets montre, qu'il s'agit de poudingue à calcaire lacustre, proviennent sans doute du pliocène continental, situé au Nord-Ouest, en amont de l'oued R'tem. (Guemache et al, 2008).

- Croute de calcaire nodulaire, trés altéré de l'ordre de 50 cm d'épaisseur.
- La section lithologique se termine par une couche argileuse et sableuse fine, moyennement consolidé d'environ 4 m d'épaisseur.

La croute calcaire et la couche argilo-sableuse, semblent former ensemble le toit de la cavité globulaire.



Fig. 23 : Photos de l'effondrement 01.

I. 1.2.2. L'effondrement N° 02

L'effondrement N° 02, (Fig. 24) est situé à environ 1,3 km au Nord-Ouest du forage H_{10-42} . D'après les habitants locaux, il serait apparu au début du mois d'octobre 2007.



Fig. 24 : Photos de l'effondrement 02

L'ouverture de l'effondrement est de forme elliptique. Elle est orientée N 110°, d'environ 7,5m de longueur sur 6,5m de largeur et de 15m de profondeur.

Malheureusement, nous n'avons pas pu étudier l'interieur de cet effondrement, en raison de sa profondeur et de son inaccessibilité, cependant, il semblait que la lithologie soit plutôt dominée par des sables et des argiles.

I. 1.2.3. L'effondrement N° 03

L'effondrement 03, (Fig. 25) est situé à environ 100m au Nord-Est du forage H_{10-42} . 2008 est l'année de son apparition, d'après les habitants locaux. L'effondrement se caractérise par une ouverture circulaire, avec 3m de diamètre et 1,5m de profondeur. La lithologie qui caractérise l'effondrement, c'est des terres argileuses et sableuses fines, moyennement consolidés.



Fig. 25 : Photo de l'effondrement 03.

I. 1.2.4. L'effondrement N° 04

L' effondrement (Fig. 26) se situe à environ 2,1 km au Sud-Est du forage H_{10-42} , dont la date exacte de son apparition reste inconnue. Il serait apparu à la dernière décennie, d'après les temoignages des habitans locaux.

L'effondrement se caractérise par une ouverture de forme elliptique, orienté N 20° avec environ 70 m de longueur sur 40 m de largeur et une profondeur de 15 m environ suivant sa topographie.

De point de vue lithologique, l'effondrement montre de bas en haut la succession lithologique suivante :

- Couche de conglomérat blanchatre et monogénique de 5 m d'épaisseur ;
- Couche de calcaire nodulaire, sous forme de blocs basculés moin altérés, de 1 m environ d'épaisseur;
- Couche argilo-sableuse épaisse, constitue de sables, d'argiles, de limons, de 3 à 4 m d'épaisseur.



Fig. 26 : Photo de l'effondrement 04, avec la section lithologique observée.

Tab.	06 : M	orphométrie	des effond	rements (Ais	sani et al., 2010).
------	--------	-------------	------------	--------------	---------------------

Effondrement	Longueur (m)	Largeur (m)	Profondeur (m)	Surface (m ²)	Volume (m ³)
1	25	20	18	500	8000
2	7,5	6,5	15	48,75	731,25
3	3	3	1,5	9	13,5
4	70	40	15	2800	42000
Total				3357,75	51744,75

I. 1.3. Les observations de surface

I. 1.3.1. Les affaissements



Fig. 27 : Photo montrant l'affaissement observé à l'intérieur de l'édifice clôturé du refroidisseur.

Prés du forage H_{10-42} , il existe un édifice clôturé, c'est un système de refroidissement des eaux chaudes remontés de l'albien par les forages. Dans le périmètre de cet édifice, nous avons constaté la présence d'un affaissement de forme quasi-circulaire d'environ 5 m de diamètre (Fig.27). Le taux d'affaissement par rapport à la dalle adjacente est estimé de 30 cm.

I. 1.3.2. Les bétoires



Fig. 28 : Photo d'une bétoire observée dans la palmeraie.

D'après les habitants locaux, il existe beaucoup de bétoires dans la zone de palmeraies. Ces dernières généralement, absorbent une quantité suffisante de l'eau de pluie et en plus les eaux qui coulent dans les ruissellements.

La plus importante (Fig.28), à une longueur d'environ 3 m et une largeur de 1 m. Selon le propriétaire de la palmeraie, toute l'eau déversée dans ce secteur pour irriguer les palmiers, disparait en quelques minutes, ca indique que cette bétoire est continue en profondeur malgré sa petite dimension observée en surface

I. 1.3.3. Les fissures

A environ 770 m du forage H_{10-42} , il existe une fissure importante (Fig.29), quasi-rectiligne, parfois sinueuse, de plus de 50 m de longueur et orientée N 80°. Il s'agit d'un chapelet de petits creux profonds entre 10 et 20 cm et large de quelques centimètres.

Il n'existe pas de rejet vertical perceptible entre les deux compartiments qui sépare la fissure. En revanche l'allure des creux nous a permet de déceler un léger déplacement latéral.



Fig. 29 : Photos montrant la fissure.

(A) : Vue oblique en trois dimensions (exagération verticale : 15X) montrant la disposition de la fissure par rapport aux écoulements d'eaux dans l'oued R'tem.

(B) : Photo montre les deux compartiments de la zone effondrée.

(C) : Photo montre Sinuosité de la fissure.

I. 2. Description de l'effondrement Tafziouine

- L'effondrement de Tafziouine (Fig. 30), présente une forme circulaire, avec un diamètre de 22m ;
- L'effondrement est d'une profondeur de 13 m avec un accès très difficile;
- ✤ Pas de fissuration de surface, aucun indice indiquant l'évolution du cratère ;
- D'après le témoignage des habitants l'effondrement de Tafziouine est daté de l'année 1997.



Fig.30 : Photos de l'effondrement de Tafziouine.

I. 3. Description de l'effondrement Sahb-Elbir

- L'effondrement de Sahb-Elbir (Fig.31), présente une forme circulaire avec un diamètre de 10m
- L'effondrement à une profondeur inconnue;
- Aucun indice de surface n'indique l'évolution du cratère ;
- On observe des failles de direction E-W et N-S connues dans la région ;
- D'après les habitants de Mansourah, l'effondrement de Sahb-Elbir est très ancien, de plus de 50 ans.



Fig.31 : Photos de l'effondrement Sahb-Elbir

La géologie

II. 1. La géologie de M'rara

II. 1.1. Introduction

L'étude géologique est une étape très importante, elle nous permettre de déterminer la nature lithologique des formations qui constituent le sous sol de la région d'étude.

II. 1.2. Géologie de surface

La région de M'rara appartient au domaine de la plate forme saharienne. Celle-ci a été structurée au paléozoïque supérieur en plusieurs bassins séparés par des hauts fonds. (Guemache et al., 2008).

Oued R'tem	N to the second se
affleurement 01	affleurement 03
	Djamaa
Le village de M'rara	and the second
All and	
Hdjira affleurement 02	05 Km
OSM AUD	G

Sur le terrain 03 coupes géologiques des affleurements ont été effectuées (Fig. 32) :

Fig. 32: Photo montre la position des affleurements. (Google Earth).

- > Une coupe géologique situé au Nord-Ouest sur la rive gauche de Oued R'tem ;
- > Une coupe géologique située à l'Est, sur la route de Djamaa ;
- > Une coupe géologique située au Sud, sur le long d'Elhjira.
- La coupe géologique de l'affleurement n° 1

L'affleurement 1 est situé 3000m au Nord- Ouest, par rapport au village de M'rara, avec les coordonnées géographiques de Latitude = $33^{\circ} 29' 21''$; et de Longitude = $5^{\circ} 37' 41''$.

La coupe géologique (Fig. 33), a été levée à l'Est de la rive de Oued R'tem. De bas en haut :

- Une couche carbonatée de Craie tendre, d'origine lacustre, de 2,5m d'épaisseur ;
- Une couche de grés verdâtre, plus ou moins friable avec une épaisseur de 1,5m ;

Ces deux couches sont séparés par une surface d'érosion irrégulière, c'est une discordance de ravinement, mais sans aucune déformation

> Une couche de gypse blanchâtre, plus ou moins dure d'une épaisseur d'1m.



Fig. 33: La coupe géologique de l'affleurement n° 01.

✤ La coupe Géologique de l'affleurement n°2

L'affleurement 2 est situé sur la route d'Elhjira, à 7km au sud par rapport au village de M'rara. Ses coordonnées géographiques sont : Latitude= 33° 26' 12'' ; Longitude= 5° 38'23''



Fig. 34: La coupe géologique de l'affleurement n° 02.

La coupe géologique de cet affleurement (Fig. 34), a été levée à l'Est de la route reliant M'rara-Elhjira. De bas en haut on a :

- > Une couche de grés dure rougeâtre, d'une épaisseur de 3m ;
- > Une couche d'argile rougeâtre friable, d'une épaisseur de 2m ;
- Une couche de sable argileux de 1m d'épaisseur ;
- > Une couche de craie, de couleur blanchâtre de 2m.

✤ La coupe Géologique de l'affleurement n°3

L'affleurement 3 est situé à l'Est, plus précisément à 10km, sur la route de Djamaa, aves les coordonnées géographiques suivantes : Latitude =33° 29'9'' ; Longitude =5°45'13''

La coupe géologique de cet affleurement (Fig. 35), a été levée à l'Ouest de la route reliant M'rara-Djamaa.

De bas en haut on a :

- > Une couche de grés à grains fin rougeâtre, friable d'une épaisseur de 4m ;
- Une couche de sable argileux de 2 m d'épaisseur ;
- Une couche de gypse blanchâtre d'une épaisseur de 1m.



Fig. 35: La coupe géologique de l'affleurement n° 03.

II. 1.3. La litho-Stratigraphique

Après les sorties effectués sur le terrain, la consultation de la documentation existante, et l'analyse des affleurements des effondrements, on a pu déterminer la nature et la succession lithologique de M'rara.



Fig. 36: Photo montre la région de M'rara, et Oued R'tem. (Google Earth)

La succession litho stratigraphique qui caractérise le terrain de M'rara (Fig.37), de bas en haut est la suivante :

Le Néogène : est représenté par le Pontien, d'une épaisseur d'environ 5 m observée dans l'effondrement 01.

Ce sont en majeur partie des formations d'altération provenant du démantèlement de l'Atlas du Crétacé, composé d'argile gréseuse, de sable, de cailloux, d'argile, des bancs de calcaires ou gypseux. L'épaisseur de ces alluvions varie de 0m au contact du Turonien de la chebka à 300m dans la fosse de Laghouat. (Monjauze, 1980).

- Le quaternaire, est représenté par 03 couches, de haut en bas on a :
- Couche argilo-sableuse épaisse de 3 à 4 m environ, qui est constitué de sable, d'argile, de limon en proportion variable selon les stations.
- Une croute de calcaire nodulaire appelée croute à dragée, sous forme de blocs basculés d'une épaisseur de 1 m environ. Elle constitue de nodules gréseux de dimensions centimétriques entourées de zone d'accroissement concentrique, plus calcaire donnant une structure zonée.
- Couche de conglomérat monogénique blanchâtre, très peu consolidé, calcareux, d'une épaisseur de 4 à 6 m environ.



Fig. 37: A : photo réelle montre la succession stratigraphique de M'rara.

B : Coupe géologique montre la stratigraphie de M'rara.

II. 1.4. Corrélation Stratigraphique à M'rara

La corrélation stratigraphique entre les forages M'rara₁₀₅, H_{10-42} , H_{10-70} qui sont presque alignés (**Fig.38**), nous a permit de réaliser la coupe suivante qui traverse la région de M'rara du Nord Ouest vers le Sud Est.



Fig.38 : Corrélation stratigraphique entre les forages : M'rara 105, H10-42, H10-70.

Une simple lecture nous permet de constater :

- Géologie homogène avec une stratification quasi horizontale des couches
- ✤ Abondance des formations carbonatées ; des calcaires, des dolomies
- Existence des formations évaporitiques ; des gypses, des anhydrites et des sels
- Existence de quelques changements d'épaisseurs notamment dans le Sénonien supérieur,
 l'Eocène et le Mio-pliocène
- Il n'existe pas de variations lithologiques notables
- Absence du sénonien salifère qui peut causer des problèmes lors des opérations de forages pétroliers, surtout dans le cas de mauvaise cimentation des puits.

La géophysique

III. La géophysique à M'rara

III. 1. Interprétation des profils

Profil n° I

Le profil N° 01, (Fig.39) de direction Est-Ouest a été effectué au Sud de l'effondrement N°4, dont le premier point de mesure est pris à l'Est.



Fig.39 : Profil E-O ; le premier point vers l'Est.

Le profil d'investigation sur une profondeur de 37,5 mètres a mis en évidence la succession de deux couches de bas en haut on a :

- Une couche meuble de faible résistivité allant de 10 à 60 Ω m. La couche d'une épaisseur variable le long du profil et elle ne contient aucune cavité souterraine.

- Une couche superficielle, sa résistivité varie de 60 à 500 Ω m. la couche contient des cavités souterraines de dimensions variables, la plus petite est de 4 mètres de longueur par 2,5 mètres de largeur, elle est détecté à 10 mètres de profondeur, dont la plus grande est de 10 mètres de longueur sur 6 mètres de largeur détecté à 11 mètres de profondeur.

Profil n° II

Le deuxième profil de direction Est-Ouest (Fig.40), a été appliqué au Nord de l'effondrement N° 4, cependant le premier point de mesure a été choisi à l'Ouest



Fig.40: Profil E-O ; le premier point vers l'Ouest.

Le profil d'investigation réalisé sur une profondeur de 37,5 m révèle la présence d'une couche meuble de résistivité faible à moyenne allant de 0 à 100 Ω m. Elle varie d'une manière graduelle et horizontale. La couche contient une cavité allongée de 45 mètres de longueur et de 4 mètres de largeur détecté à 20 mètres de profondeur.

Profil n° III

Le profil N°03 (Fig.41), de direction Nord-Sud a été établi à l'Ouest de l'effondrement N°4, dont le premier point de mesure est pris au Nord



Fig.41 : Profil N-S le premier point vers le Nord.

Le profil d'investigation sur une profondeur de 37,5 m révèle la succession de deux couches de bas en haut on a :

-Une couche meuble de résistivité faible à moyenne, elle varie entre 20 à 100 Ω m et elle ne renferme aucune cavité souterraine.

-Une couche plus résistante que la première, sa résistivité varie de 100 à 180 Ω m. Cette couche exprime bien la présence des cavités de dimensions variables, la plus grande est de 35 mètres de longueur et de 20 mètres de profondeur et d'autres petites cavités circulaires en début de leurs formation, l'une détecté à 5 mètres de profondeur et de 5 mètres de diamètre et l'autre détecté à 20 mètres de profondeur et de 4 mètres de diamètres.

Profil n° VI

Le deuxième profil de direction Nord-Sud (Fig.42) a été effectué à l'Est de l'effondrement N° 4, cependant le premier point de mesure est pris au Sud



Fig.42 : Profil N-S le premier point vers le Sud.

Le profil d'investigation sur une profondeur de 37,5 m a mis en évidence la succession de deux couches de bas en haut on a :

- Une couche de résistivité très faible, allant de 8 à 28 Ω m et d'une épaisseur légèrement variable. La couche parait constituer des marnes et des argiles et elle ne contient aucune cavité souterraine.

- Une couche meuble de faible résistivité qui varie entre 28 et 48 Ω m et d'une épaisseur légèrement variable, elle est constitué par des alluvions et ne contient pas de cavités souterraines.

Les analyses chimiques et minéralogiques

L'analyse aux laboratoires des échantillons prélevés des différents couches constituant la région de M'rara représentés du plus ancien au plus récent sont ;

IV. 1. La couche de sable argilo-gypsifère du Mio-pliocène

IV. 1.1. Etude macroscopique

Les sédiments du Mio-pliocène forment l'assise de base du Quaternaire dans la région de M'rara. Macroscopiquement (Fig.43), ils sont constitués des sables rouges grossiers, des argiles, et des gypses sous forme de lentilles d'ordre millimétrique. Les roches présentent une dureté faible.



Fig.43 : Photos montrant l'échantillon du sable argilo-gypsifère.

IV. 1.2. Etude chimique

Tab.07 : Résulta	ts d'analyse	chimique du	sable	argilo-gypsifère
------------------	--------------	-------------	-------	------------------

Teneur en	Insolubles	Sulfates	carbonates
(%)	59,6	29,3	10

D'après les résultats de l'analyse chimique (**Tab.07**), la couche du sable argilo-gypsifère apparait constituer essentiellement des insolubles 59,5 %, en revanche la présence de la calcite est de 10% d'une quantité très faible, alors que les 30 % des sulfates représentent une quantité considérable.

IV. 1.3. Etude minéralogique

Etude pétrographique ; l'analyse pétrographique par la confection des lames minces appliqué à l'échantillon du sable argilo-gypsifère (Fig.44), montre la composition minéralogique suivante ;

- Des quartz non altérés, automorphes à sub-automorphes, d'une taille varie de 1 μ jusqu'à 40 par 20 μ , et représentent 60% sur la lame.

- Des lentilles de gypse varient de 20 à 30µ par 200µ, représentent 25% sur la lame.

- Le ciment est dominé par les oxydes de fer de couleur marron, donc ce ciment est de nature ferrugineuse et représente 10% sur la lame.



Fig.44 : les lames minces de l'échantillon du sable argilo-gypsifère sous microscope polarisant en LPA. (G ; gypse, Q ; quartz, C.F ; ciment ferrugineux)

* Analyse aux rayons X



Fig.45 : Diagramme des RX de l'échantillon de sable argilo-gypsifère.

L'étude minéralogique par l'application de la méthode des rayons X sur l'échantillon du sable argilo-gypsifère (Fig.45), confirme bien les résultats d'analyse chimique et de l'étude pétrographique. Une simple constatation du diagramme nous permet de lire la composition minéralogique suivante :

- Le quartz qui est représenté par les pics rouge ;
- Le gypse qui est représenté par les pics bleus ;
- La calcite et le magnésium qui sont représentés par les pics verts.

IV. 2. Les conglomérats du villafranchien supérieur

IV. 2.1. Etude macroscopique

L'étude macroscopique de l'échantillon prélevé des couches conglomératiques (**Fig.46**) montre qu'il est constitué en majeur partie de poudingues blanches de même nature (monogénique) de dimension varie entre 2mm à 2 cm qui représente la classe du rudite lié par un ciment de couleur rose à rougeâtre. Ce conglomérat apparait bien consolidé.



Fig.46 : photos illustratives de l'échantillon de conglomérat.

IV. 2.2. Etude chimique

Tab.08 : Résultats d'analyses chimiques de l'échantillon de conglomérat.

	insolubles	sulfates	carbonates
Teneur en %	29,3	29,1	41

Les résultats d'analyse chimique montre que la couche conglomératique (Tab.08), est constituée en majeure partie de la calcite (41%), avec la présence considérable des gypses (29,1%) et des insolubles (29,3%).

IV. 2.3. Etude minéralogique

Etude pétrographique

L'étude pétrographique de la lame mince appliqué sur le conglomérat (Fig.47), montre la composition minéralogique suivante :

- Des fragments de quartz, non altéré, automorphe et parfois arrondis, d'une taille de 40 par 20μ , et sa présence sur la lame étudiée est de 30%.

- Des évaporites représentés surtout par de l'anhydrite de différentes couleurs jaune, verte et bleue. L'anhydrite représente 20% sur la lame étudiée.

- De la calcite cryptocristalline qui englobe la lame par une présence de 50%.



Fig.47 : Photos des lames minces de l'échantillon de conglomérat sous microscope polarisant en LPA. (Q : quartz ; C : calcite cryptocristalline ; A ; anhydrite).



Etude aux rayons X

Fig.48 : Diagramme des RX des conglomérats.

L'analyse aux rayons X appliquée sur l'échantillon du conglomérat du villafranchien supérieur (Fig.48), révèle l'existence de trois composants principaux :

- les carbonates de calcium sont représentés par les pics rouges ;
- les gypses sont représentés par les pics bleus ;
- les quartz sont représentés par les pics verts.

IV. 3. Les Calcaires du villafranchien supérieur

IV. 3.1. Etude macroscopique La croute calcaire (Fig.49), est teintée d'une couleur ferrugineuse des oxydes de fer. Elle est constituée des éléments détritiques de différentes formes telles que les poudingues allongés et les brèches anguleuses de même nature, monogénique et de différentes tailles d'ordre millimétrique à centimétrique, entourée de zones d'accroissement concentrique plus calcaire donnant une structure zonée.



Fig.49 : photos de l'échantillon de l'encroutement calcaire

IV. 3.2. Etude chimique

Tab.09: Résultats d'analyses chimiques de l'échantillon de l'encroutement calcaire

Topour on $(9/)$	insolubles	sulfates	carbonates	
Teneur en (%)	35	6	58	

L'analyse chimique de l'encroutement calcaire (**Tab.09**), révèle une composition plus calcaire de 58%, avec une teneur moyenne d'insolubles estimés de 35% et une très faible concentration de sulfates 6%.

IV. 3.3. Etude minéralogique

✤ Etude pétrographique ; la lame confectionnée sur la croute calcaire (Fig.50) présente un phénomène de zonage. Des quartz à l'intérieur sont automorphes à subautomorphes à ciment carbonatés faite de la calcite cryptocristalline. L'abondance des quartz est de 30%, tandis que le ciment de la calcite cryptocristalline domine la lame mince de 60%.



Fig. 50: Photos des lames minces de l'échantillon des encroutements calcaires sous microscope polarisant en LPA. (Q; quartz, C; calcite cryptocristalline, M.O; minéraux opaques)

***** Etude aux rayons X



Fig.51 : Diagramme des rayons x des encroutements calcaires

L'étude microscopique par le diffractomètre des rayons x appliqué sur l'échantillon calcaire du villafranchien supérieur (Fig.51), nous permet de mettre en évidence la composition minéralogique suivante :

-La calcite en pics rouges ;

-le quartz en pics bleus ;

-Le gypse en pics verts.

IV. 4. La couche argilo-sableuse de surface

D'après les résultats d'analyses chimiques (**Tab.10**), la couche superficielle argilo-sableuse est constituée essentiellement des insolubles tels que les argiles, les sables de 53%, et partiellement les sulfates et les carbonates qui représentent respectivement 23% et 20%.

Tab.10 : Résultats d'analyses chimiques de la couche argilo-sableuse de surface.

Teneur en % dans le sol	insolubles	sulfates	carbonates	
	53	23	20	

L' hydrochimie

V. 1. Les facies chimiques

Par la lecture des résultats des analyses physico-chimiques (**Tab.11**), des différents puits, le diagramme de Piper (**Fig.52**), nous permet d'avoir une approche globale de la composition chimique des eaux de la nappe phréatique et les eaux de la crue de Oued R'tem. Il montre bien que les eaux des quatre stations présentent une seule famille: Sulfaté Calcique et Magnésien.

Tab. 11: Résultats des Analyses chimiques des eaux de la nappe phréatique et des eaux de surface
du bassin versant de l'oued R'tem.

Elément	Na mg/l	K mg/l	Ca mg/l	Mg mg/l	Cl mg/l	Hco3 mg/l	So ₄ mg/l	NO ₃ mg/l	T C ⁰	РН	Conductivité us/cm
Puits 1	110.16	8.78	325.63	166.46	308.33	191.00	1184	14.21	16.56	7.4	1360
Puits 2	104.19	7.75	247.19	164.00	288.86	130.90	866.10	0.49	18.12	7.52	1165
Puits 3	98.56	6.92	216.52	132.89	278.02	108.65	658.44	0.50	17.06	7.79	1087
Crue 12/03/2011	102.98	9.53	320.17	160.35	310.98	180.15	1208.02	13.25	15	7.5	2456





Le diagramme de piper montre que les eaux sont tous Sulfatées mais dans le triangle des Cations sont entre Calcique et Magnésien.

Donc le facies chimiques des eaux est Sulfaté Calcique et Magnésien.

Le diagramme de H. SCHOELLER BERKALOFF (Tab.12, Fig.53), montre une seule famille d'eau ; Sulfatée Calcique et Magnésienne.

Station	Formules cara	Faciès chimiques	
Puits 1	$SO4^{-2} > CL > HCO_3^{-1} > NO_3^{-1}$	$Ca^{+2} > Mg^{+2} > Na^{+} + K^{+}$	Sulfaté Calcique
Puits 2	$SO4^{-2} > CL > HCO_3^{-1} > NO_3^{-1}$	$Mg^{+2} > Ca^{+2} > Na^{+} + K^{+}$	Sulfaté Magnésien
Puits 3	$SO4^{-2} > CL > HCO_3^- > NO_3^-$	$Ca^{+2} = Mg^{+2} > Na^{+} + K^{+}$	Sulfaté Calcique et magnésien
Crue 12/03/2011	$SO4^{-2} > CL > HCO_3^- > NO_3^-$	$Ca^{+2} > Mg^{+2} > Na^{+} + K^{+}$	Sulfaté Calcique

Tab.12 : Classification des eaux selon SCHOELLER-BERKALOFF

Selon ces deux diagrammes (PIPER et SCHOELLER BAKALOFF) on peut dire que les eaux des quatre stations sont marquées par les Sulfates qui s'accompagnent tantôt de Calcium tantôt de Magnésium, ce ci est en liaison directe avec la présence des marnes gypseuses et des formations carbonatées notamment les calcaires et les dolomies.



Fig.53 : Classification des eaux par le diagramme de SCHOELLER.

V.2. Les paramètres physiques

✤ La température (T C⁰)

La température joue un rôle primordial dans la solubilité des sels et des gaz, donc sur la conductibilité. Elle permet de différencier entre les eaux qui circulent en profondeur et celles

qui circulent près de la surface, c'est l'un des facteurs qui influe sur la vitesse des réactions chimiques. La température moyenne mensuelle de l'air dans la région d'étude est de l'ordre de 21.45[°] C. La température de l'eau est enregistrée pendant le mois d'Avril.

* Conductivité électrique (CND us/cm)

A partir de la conductivité électrique on peut évaluer le degré de la salinité de l'eau, elle est aussi fonction de la température ; elle augmente avec la concentration des ions en solution et la température.



Fig.54 : l'évolution de la conductivité de l'aval vers l'amont.

Pendant la période d'étude (Fig.54), on remarque que les valeurs de la conductivité électrique sont comprises entre (2456-1087 *us*/cm). Pour la station (Crue) qui est situées sur Oued R'tem, la conductivité est très élevée, elle est supérieure aux normes de l'OMS. Cette forte minéralisation est liée à la présence des marnes gypsifères dans cette crue. Mais au niveau des trois puits les valeurs de conductivités sont faibles par rapport à la norme de potabilité (OMS ≤ 1500 u S/cm). Donc la crue du 12/03/2011montre une salinité des eaux élevée, par contre les valeurs de salinité d'eau au niveau des 03 puits sont faible à très faible.

Potentiel d'hydrogène (pH)

Les valeurs du PH mesurées au niveau des différents points de prélèvement lors des différentes compagnes varient entre (7.4 et 7.8), (Fig.55). Ces valeurs sont identiques pour l'ensemble du bassin versant et pratiquement proches dans le temps et dans l'espace.



Fig.55 : L'évolution de PH de l'amont vers l'aval.

V. 3. Les Eléments chimiques

V. 3.1. Les cations

✤ Le calcium (Ca++)

Le calcium est un élément alcalinoterreux, il se trouve dans les eaux thermo-minérales circulant en milieu calcaire et aussi en particulier dans les roches calcaires sous forme de carbonate. Le calcium peut provenir également des formations gypsifères (Ca SO4, 2H2O), qui sont facilement solubles. La teneur du calcium varie entre 216,52 mg/l dans la crue (12/03/2011) à 325,63 mg/l dans le puits 1. (Fig.56).



Fig. 56 : la répartition de Ca++ dans la zone d'étude.

Magnésium (Mg++)

C'est un élément qui accompagne souvent le calcium, et provient de la dissolution des dolomies, des calcaires dolomitiques et des minéraux ferromagnésiens. On remarque que la Variation des concentrations du magnésium est similaire de celle du calcium. La teneur minimale (Fig.57), du Mg++ est enregistrée dans le puits 3 avec une valeur de 132.89 mg/l, et la teneur maximale est enregistrée dans le puits 1 avec une valeur de 166.46 mg/l.



Fig.57 : La répartition de Mg⁺⁺ dans la zone d'étude.

Potassium (K+)

C'est un élément alcalin, très réactif avec l'eau, on le retrouve dans les roches ignées et dans la nature sous forme de chlorure double dans de nombreux minerais. Il se trouve aussi dans la végétation sous forme de carbonate. Les teneurs maximales du potassium varient entre 9.53 mg/l au niveau du crues (12/03/2011) et 6.92mg/l dans le puits 3.

Sodium (Na++) :

C'est un élément qui existe dans la totalité des eaux car la solubilité de ses sels est très élevée en agriculture, le composé du sodium le plus important est le chlorure de sodium. Le Sodium

constitue un élément de maintien de la perméabilité du sol. Les teneurs maximales du Sodium varient entre 110.16 mg/l au niveau du puits 01et 98.56mg/l dans le puits 03.

V. 3.2. Les Anions

♦ Chlorures (Cl⁻)

Les chlorures peuvent avoir plusieurs origines .et sont liés principalement à la dissolution des terrains salifères. La dissolution de ces sels étant très facile d'où leurs présences en fortes concentrations dans les eaux ayant traversées les formations argilo - Sableuses ou argileuses. Ainsi, ils peuvent provenir également de l'action humaine à partir du soulage des routes, ou par contamination par les eaux usées. Les chlorures donnent un goût désagréable et posent le problème de la corrosion dans les canalisations et les réservoirs à Partir de 50 mg/l (norme de l'OMS). Les teneurs varient entre 278.02mg/l au puits 3 et 310 mg/l au niveau de la crue (12/03/2011).

***** Bicarbonate (HCO3⁻⁻):

Les bicarbonates se trouvent dans les eaux naturelles, leur présence dans l'eau est due à la dissolution des formations carbonatées tel que les calcaires et les dolomies. La teneur maximale est enregistrée dans le puits 1 avec une forte teneur de 191.00mg/l. La teneur minimale se localise dans le puits 3avec une valeur égal 108.65mg/l

Sulfates (SO4⁻):

Ils sont présents dans les eaux naturelles à des teneurs très variables et Ils peuvent provenir de La dissolution du gypse. Ce dernier peut être triasique, comme il peut être associé à des formations plus récentes comme les argiles du Mio-Plio-Quaternaire. Ils dépendent aussi des rejets industriels. Les résultats des analyses chimiques (Fig.58), donnent des valeurs qui varient de 1184 mg/l au niveau de puits 1et à 1208.02 mg/l au niveau de crus (12/03/2011).



Fig. 58 : la répartition de So₄⁻ dans la zone d'étude.

V. 3. Dureté et alcalinité des eaux

La dureté correspond à la présence des ions alcalino-terreux: Calcium et Magnésium dans l'eau, en fonction de cette dureté, on défini le Titre Hydrotimétrique (TH), avec:

TH (°F) = (
$$[Ca^{2+}] + [Mg^{2+}]$$
) ×5, $[Ca^{2+}]$ et $[Mg^{2+}]$ en meq.]
asser les eaux comme suit (Tab.13):

Ainsi, on peut classer les eaux comme suit (Tab.13):

TH (°F)	Spécificité de l'eau		
0 à 6	Eau très douce		
6 à 15	Eau douce		
15 à 30	Eau moyennement dure		
30 et plus	Eau très dure		

Tab.13 : Classification d'une eau selon sa dureté. (O.M.S.1994)

Le Titre Alcalimétrique (TA) et le Titre Alcalimétrique Complet (TAC) traduisent l'alcalinité d'une eau. L'alcalinité correspond à la présence d'ions OH, CO_3^2 et HCO_3^2 :

$$TAC = [OH] + [CO_3^2] + [HCO_3]; en meq.l^{-1}$$

Si le pH de l'eau est : < 4.5 \rightarrow TAC = 0
> 8.3 \rightarrow TAC = (CO_3^2) + (OH)
< 8.3 \rightarrow TA = 0 et TAC = HCO3

Les points de prélèvement	TH (°F)	TAC (mg/l)					
Puits 1	246.04	191.00					
Puits 2	205.59	130.90					
Puits 3	205.45	108.65					
Crue	240.26	180.15					

Tab. 14 : Les valeurs de TH (°F) et TAC (mg/l)



Fig. 59 : Classification des eaux selon sa dureté.

La dureté totale calculée pour les eaux des points de prélèvement varie entre 246.04 et 205.45°F.D'après le (Tab.14) et la (Fig.59) on déduit que la classification des eaux des points de prélèvement sont donc très dures.

V. 3.1. Nature de dureté des eaux

A partir des résultats de duretés des eaux on peut classifier l'origine de dureté des eaux en deux types : dureté des eaux carbonaté et dureté des eaux non carbonaté.

Tuo. 15. Du clussification de durcie des caux des points de preterentents							
Les points de	Total mg/l	Carbonate mg/l	Non-Carbonate mg/l				
prélèvement							
Puits 1	1490,3	313,31	1177				
Puits 2	1292,6	214,72	1077,9				
Puits 3	1087,9	178,22	909,67				
Crue	1484,5	295,51	1189				

Tab. 15: La classification de dureté des eaux des points de prélèvements



Fig.60 : Histogramme de la nature de dureté des eaux de points de prélèvement.

Selon le (Tab.15) et la (Fig.60) on déduit que la majorité de dureté des eaux des points de prélèvement sont des duretés non carbonaté, alors que celle de nature carbonatée est faible.

V. 4. Aptitude des eaux à l'irrigation

L'aptitude des eaux à l'irrigation peut être évaluée par un certain nombre de coefficients plus ou moins fiables et parmi lesquels nous retenons le S.A.R.

Le S.A.R (coefficient d'absorption du sodium) est un indice qui mesure le danger que représente l'existence d'une teneur donnée en sodium de l'eau. Il s'obtient par la formule suivante:

S.A.R= $r Na^{+} / (r Ca^{++} + r Mg^{++})^{1/2}$

Les valeurs du S.A.R et les conductivités exprimées en μ S/cm à 25°C sont placées sur le diagramme de WILCOX. Ce diagramme de classification des eaux d'irrigation comporte les subdivisions suivantes:

SAR<10:eaux utilisées avec peu de danger d'alcalinisation.

10<SAR<18: eaux utilisées avec un danger appréciâtes d'alcalinisation.

18<SAR<26: eaux utilisées peu provoquer un danger d'alcalinisation.

SAR>26: eaux présentant un danger d'alcalinisation très fort.

1 ub.10 . Les Vu	ieurs ue D.A.K
Les points de prélèvement	S.A.R
Puits 1	4.97
Puits 2	5.14
Puits 3	5.27
Crue	4.70

Tab.	16	:	Les	valeurs	de	S.A	1. <i>R</i>

Tous les points de prélèvement (**Tab.16**), ont un S.A.R compris entre 4 et 6 donc elles sont eaux utilisées avec peu de danger d'alcalinisation.



Fig. 61: Diagramme de classification des eaux d'irrigation pour les points de prélèvement.

On constate sur le diagramme (**Fig.61**), que les eaux des puits 1,2, et 3 sont situées dans la classe C3-S1, qui sont de qualité Admissible ; eau convenant à l'irrigation de cultures tolérantes au sel sur des sols bien drainés, l'évolution de la salinité doit cependant être contrôlée alors que l'eau de la crue se situe dans la classe C4-S1 qui est de qualité Médiocre , eau fortement minéralisée pouvant convenir à l'irrigation de certaines espèces bien tolérantes au sel et sur des sols bien drainés et lessivés .

L'hydrologie

VI. 1. Les crues de Oued R'tem

L'écoulement dans les régions Sahariennes se résume au passage des crues provoquées généralement par des pluies de courte durée qui se manifestent de façon catastrophique constituant ainsi une contrainte pour les activités et une entrave pour le développement.

L'Oued R'tem de sa part présente des crues très violentes (**Tab.17**), qui arrivent à immerger le périmètre de M'rara pendant plusieurs jours.

Année	Mois des crues Nature des crues		Le temps de séjour des eaux des crues	Débits Max évalués (m3/s).
1956	Septembre	violente	deux semaines	-
1957	-	-	un mois	-
1960	-	très importante	-	-
1961	Juin	forte	plusieurs jours	-
1963	-	forte	plusieurs jours	-
1964	fin	modeste	-	-
1966	Septembre	-	-	-
1969	Septembre	Très violente	Plusieurs j (> 15 j)	-
1973	Mars. Mai	importantes	-	-
1977	Janvier	Assez forte	-	-
1984	Mars. Mai. Novembre	fortes	Quelques jours	-
1987	Octobre. Décembre	fortes	2 à 3 jours	-
1989	Novembre	moyenne	2 jours	-
1994	Septembre. Octobre	violentes	4 jours	162
1995	Septembre	forte	2 jours	115
1996	Septembre	Moyenne	1 jours	78
1997	Avril	Très forte	2jours	208
1997	Décembre	moyenne	1 jours	56

 Tab. 17 : Tableau récapitulatif des crues de Oued R'tem. (A.N.R.H.Ouargla)

VI. 2. Analyse des données pluviométriques

VI. 2.1. Teste d'homogénéité

Avant de déterminer les différentes caractéristiques des précipitations, une vérification rigoureuse et détaillé des données est nécessaire. Par l'utilisation du test de wilcoxon (**Tab.18**), qui servira pour le contrôle de l'homogénéité d'une série statistique de 40 ans (1967-2007) au niveau de la station de Touggourt.

D'après (Sari Ahmed, 2002), La condition pour que la série soit homogène est :

$$W_{min} < W_x < W_{max}$$

Wmin = $\frac{[(N1+N2+1)\times N1]-1}{2} - Z1 - \frac{\alpha}{2}\sqrt{\frac{N1\times N2(N1+N2+1)}{12}} = 296,5$;

Wx = 371. Représente la somme des rangs des Xi ;

 $Wmax = [(N1 + N2 + 1) \times N1] - Wmin = 441,5;$

Z1 $-\frac{\alpha}{2}$ = 1,96. Représente la valeur de la variable réduite de la loi normale ;

N1 = X = 18. Taille de la série pluviométrique ;

N2 = Y = 22. Taille de la série pluviométrique ;

L'inégalité est vérifiée : **296,5**< **371**<**441,5**

Donc, notre série est homogène.

VI. 2.2. Représentativité de la période d'observation retenue

Une période est dite représentative, si elle comprend au moins une période humide et une autre sèche. Cette représentativité va être vérifiée par la méthode des écarts à la moyenne cumulés. **(Tab.19)**.

VI. 2.2.1. La méthode des écarts à la moyenne cumulés

Elle consiste à calculer les modules $Ki = \frac{Pi}{P}$, ainsi que les différences (Ki -1), et les sommes (Ki-1), puis à reporter sur un système d'axes rectangulaire les sommes en fonction du temps.

Si la courbe est croissante, c'est une période humide. Si elle est décroissante, elle sera sèche.

Pour que la série soit représentative, il faut que : $Kmoy = \frac{Lf - Ld}{m} + 1$, et Kmoy = 1

Lf, et Ld : ordonnées final et initial de la courbe ;

Kmoy : module moyen sur la période considéré ; M : durée de la série.



Fig. 62: Graphe de la méthode des écarts à la moyenne cumulés.

Station de Touggourt.

 $\text{Kmoy} = \frac{0,85 - 0,45}{40} + 1 \; ; \; \text{Kmoy} = 1,01$

Parce que la série pluviométrique contient (Fig.62) :

Plusieurs périodes humides et autres sèches, et comme : Kmoy = 1,01.

Donc : la série pluviométrique est représentative.

Х	Y	Rang	X u Y par ordre croissant	Série d'origine
39	81,3	1	168,7	Y
78,3	42,1	2	153,8	X
31	54,5	3	146,6	Y
60,1	11,5	4	126,1	Y
85,4	146,6	5	118,1	X
72,7	40,5	6	100,7	X
46,3	126,1	7	88,4	Y
118,1	55,2	8	85,4	X
100,7	48,6	9	84,9	Y
44,7	61,4	10	81,3	Y
35	88,4	11	78,3	X
51,9	69	12	77,5	Y
153,8	38,6	13	77,1	Y
71,6	77,5	14	77	Y
72,5	21,2	15	72,7	X
31,6	38,7	16	72,5	X
31,1	32,9	17	71,6	X
54,5	77	18	69	Y
	168,7	19	61,4	Y
	25,7	20	60,1	X
	84,9	21	55,2	Y
	77,1	22	54,5	Y
		23	54,5	X
		24	51,9	X
		25	48,6	Y
		26	46,3	X
		27	44,7	Χ
		28	42,1	Y
		29	40,5	Y
		30	39	X
		31	38,7	Y
		32	38,6	Y
		33	35	X
		34	32,9	Y
		35	31,6	X
		36	31,1	X
		37	31	X
		38	25,7	Y
		39	21,2	Y
		40	11,5	Y

Tab. 18: Test de WILCOXON appliqué à une série pluviométrique annuelleDe 40 ans (1968 – 2007). Station de Touggourt.

Tab.19 : la méthode des écarts à la moyenne cumulée appliqué à une sériePluviométrique annuelle de 40 ans (1968 – 2007). Station de Touggourt

Année	Pluie moyenne (mm)	Ki =Pi/P	Ki-1	Σ (Ki -1)
1968	39	0,58	-0,42	-0,42
1969	78,3	1,18	0,18	-0,24
1970	31	0,46	-0,54	-0,78
1971	60,1	0,90	-0,1	-0,88
1972	85,4	1,29	0,29	-0,59
1973	72,7	1,10	0,1	-0,49
1974	46,3	0,70	-0,3	-0,79
1975	118,1	1,78	0,78	-0,01
1976	100,7	1,52	0,52	0,51
1977	44,7	0,67	-0,33	0,18
1978	35	0,53	-0,47	-0,29
1979	51,9	0,78	-0,22	-0,51
1980	153,8	2,32	1,32	0,81
1981	71,6	1,08	0,08	0,89
1982	72,5	1,09	0,09	0,98
1983	31,6	0,47	-0,53	0,45
1984	31,1	0,47	-0,53	-0,08
1985	54,5	0,82	-0,18	-0,26
1986	81,3	1,23	0,23	-0,03
1987	42,1	0,63	-0,37	-0,4
1988	54,5	0,82	-0,18	-0,58
1989	11,5	0,17	-0,83	-0,41
1990	146,6	2,21	1,21	-0,2
1991	40,5	0,61	-0,39	-0,59
1992	126,1	1,90	0,9	0,31
1993	55,2	0,83	-0,17	0,14
1994	48,6	0,73	-0,27	-0,13
1995	61,4	0,92	-0,08	-0,21
1996	88,4	1,33	0,33	0,12
1997	69	1,04	0,04	0,16
1998	38,6	0,58	-0,42	-0,26
1999	77,5	1,17	0,17	-0,09
2000	21,2	0,32	-0,68	-0,77
2001	38,7	0,58	-0,42	-0,19
2002	32,9	0,49	-0,51	-0,7
2003	77	1,16	0,16	-0,54
2004	168,7	2,55	1,55	1,01
2005	25,7	0,38	-0,62	0,39
2006	84,9	1,28	0,28	0,67
2007	77,1	1,16	0,16	0,83

VI. 3. Calcule des crues de Oued R'tem

Le calcul des débits maximaux se fait par des formules empiriques car le bassin versant de Oued R'tem ne dispose d'aucune station hydrométrique

En Algérie, on utilise souvent les formules de Mallet Gauthier, et Giandotti.

VI. 3.1. Formule de Mallet Gauthier (Sari Ahmed, 2002)

Etablit sur la base de données algérienne. Elle tient en compte les caractéristiques du bassin versant de Oued R'tem :

$$\mathbf{Q}\max = 4\log\left(1 + 25\ \mathrm{P}\right) \times \frac{\mathrm{S}}{\sqrt{\mathrm{L}}} \times \sqrt{1 + 4\log T - \log S}$$

S : superficie du Bassin versant (km²) ; L : longueur de l'Oued (km) ;

P : pluie moyenne (mm) ; T : période de retour (ans)

Tab.20 : Résultats des débits Max, par la formule de Mallet Gauthier.

Période de retour (ans)	5	10	20	50	100
Débits max (m ³ /s)	213	612,28	839,28	1067,7	1212,21

VI. 3.2. Formule de Giandotti : (Sari Ahmed, 2002)

Prend en considération les pluies de courte durée.

$$Qmax = \frac{100 \times S \times P \times Ts \times \sqrt{H}moy - Hmin}{4\sqrt{S} + 1.5 L}$$

S : Superficie du bassin versant (km²) ; L : Longueur du talweg principale (km) ;

P: Pluie de duré Tc (m).

Tab.21 : Résultats des débits Max, par la formule de Giandotti.

Période de retour (ans)	5	10	20	50	100
Débits Max (m ³ /s)	486	606,9	744,6	927,2	1081,8

VI. 3.3. La méthode hydraulique (E.N.E.HYD. 1998)

Cette méthode est basée sur les enquêtes de terrain, et les témoignages des riverains. Elle nous a permet de repérer les traces des crues au niveau de deux sections (El Merdef, et Kef Sliman).

D'après la méthode hydraulique, la valeur du débit maximal des crues est de : 690m³/s.

D'après les résultats obtenus par différentes méthodes, on remarque que la valeur du débit maximal obtenu sur la base de la méthode hydraulique se rapproche des valeurs des débits décennaux (période de retour de 10 ans), obtenu par les formules empiriques.

Donc le débit maximal fréquentiel des crues de oued R'tem est estimé comme suit :

 $(612,28+606,9+690) / 3 = 636,4 \text{ m}^3/\text{s}.$

VI. 4. Hydrogramme de crues au site de la digue existante

L'estimation de l'hydrogramme de crue est faite sur la base de la méthode de SOKOLOVSKY.

Tab.22 : Résultat de l'hydrogramme de crue pour T = 10 ans.

Montée de	e la crue	Décente de la crue					
t (h)	$\begin{array}{c} Q_{\max} \\ (m^3/s). \end{array}$	t (h)	$\begin{array}{c} Q_{\max} \\ (m^3/s). \end{array}$	t (h)	$\begin{array}{c} Q_{max} \\ (m^3/s). \end{array}$	t (h)	$\begin{array}{c} \mathbf{Q}_{\max} \\ (\mathbf{m}^3/\mathbf{s}). \end{array}$
0	0	0	636,4	40	181,4	80	20,1
4	6,7	4	573,3	44	154,6	84	14,3
8	26,8	8	514,6	48	130,5	88	9,7
12	60,25	12	460	52	109,1	92	6,2
16	107,1	16	409,4	56	90,2	96	3,7
20	137,4	20	362,65	60	73,6	100	1,95
24	241	24	319,6	64	59,15	104	0,9
28	328	28	280	68	46,7	108	0,3
32	428,45	32	244	72	36,2	112	0,05
36	542,25	36	211	76	27,4	117	0
39	636,4						



Fig.63: Hydrogramme de crue, T = 10 *ans.*

Le manque de station hydrométrique nous a obligé à utiliser plusieurs méthodes d'estimation des crues, il serait donc préférable d'implanter une station hydrométrique qui contrôle les apports de l'Oued R'tem pour une estimation des crues aussi correcte que possible.

Discussions et perspectives

Discussions des effondrements du Sahara septentrional

I. Introduction

Le sol et la roche évoluent dans le temps. Ils perdent leurs caractéristiques mécaniques sous l'effet des infiltrations d'eau, ils se détériorent sous l'effet des charges qui leurs sont appliquées tel que les poids des terres. Lorsque ses sollicitations deviennent insupportables, des effondrements plus ou moins important peuvent se produire. (P.E.R., 1993).

La lithologie et l'eau sont les deux paramètres naturels influençant le déclanchement de l'aléa effondrement : d'un coté, les matériaux ont une influence déterminante sur l'évolution des effondrements. Ils doivent être favorables à la création et au développement de cavités. La nature des terrains surmontant les cavités conditionnent également le développement en surface du mouvement, d'autre part la création de cavités naturelles dans le sous sol est liée à la circulation souterraine d'eau qui entraine des phénomènes d'érosion et d'altération dans les formations traversées. (P.P.R.M.T., 2009).

Par la lecture de la lithostratigraphie et selon la situation hydrique caractérisant la région de M'rara et d'après les résultats obtenus de la géophysique, de l'hydrochimie et des analyses chimiques et minéralogiques des échantillons de sol prélevés, on a pu faire un diagnostic et discuter les effondrements de M'rara.

I. 2. Discussion des effondrements caractérisant la région de M'rara

Le point commun à toutes les manifestations de surface (affaissements, effondrements, fissures et bétoires) qui affectent la région M'rara, c'est l'eau avec son action de dissolution et d'érosion. Oued R'tem et les eaux d'irrigation chaudes de l'albien sont principalement les deux origines des eaux s'écoulant dans la région, ils sont responsables de l'alimentation de la nappe libre circulant à faible profondeur (de 10 à 60 m).D'après (Nesson, 1967) Oued R'tem connait des écoulements annuels au moment où les pluies tombent sur son bassin versant situé dans la partie orientale de la région. Bien plus rare sont ceux qui inondent cette daïa et en recouvert le fond pendant plusieurs jours. A l'action de cette eau fluviatile vient s'ajouter à partir de l'année 1959, le travail des eaux des puits forés dans la nappe albienne. Des volumes non négligeables ont sans doute eu une importance aussi grande que ceux fournis par Oued R'tem.

D'après (Pomerol et al., 2006), un massif rocheux n'ai jamais homogène, il présente toujours des discontinuités (fissures, diaclases, joints de grains) qui fragilissent la roche. Ce sont les lieux préférentiels de circulation des fluides et le début des processus de dissolution et d'érosion mécanique. D'après (Ek, 2006), c'est très généralement l'eau venant de la surface, qui creuse les grottes, elle s'enfonce dans le massif par des puits ou des fissures. D'après (Guemache et al., 2008), des déformations tectoniques existent dans le Mio-pliocène au Sahara algérien qui expriment les contrecoups des évènements tectoniques ayant fait naitre le domaine atlasique au cénozoïque. Elles se traduisent principalement à l'échelle de l'affleurement par des diaclases quasi-perpendiculaires à la stratification de dimensions variables allant de quelques centimètres à plusieurs dizaines de mètres. D'après nos observations de terrain, M'rara dénote l'existence de nombreuses fissures à la surface, dont la plus importante est de plus de 50 m de longueur mais aussi dans la couche du sable argilo-gypsifère du Mio-pliocène (Fig.64), de sorte que les fissures sont d'ordre métrique et leurs ouvertures sont observables. Donc, la présence des fissures confirment l'existence des actions d'infiltration et de circulation souterraine dans les formations Mio-pliocène.


Fig.64 : Les fissures dans la couche du Mio-pliocèn dans la région de M'rara

D'après (Ek, 2006), la dissolution chimique est le processus original, qui permet l'élargissement des conduits, c'est le caractère originel du karst, et sans lui le développement des cavernes ne pourraient démarrer. Par la lecture de la composition chimique et minéralogique des dépôts Miopliocène, la dissolution a été simple, c'est une hydratation. Car d'après (Bourrie et al., 2008), les réactions d'une dissolution simple comme chez les gypses, ne consomme globalement ni des ions H+, ni de l'oxygène, de sorte que la solubilité ne dépend pas du P^H, ni du potentiel d'oxydoréduction. Donc les gypses du Mio-pliocène sont mise en solution et entrainer par les eaux courantes en profondeur. Par contre dans les dépôts quaternaires des conglomérats et des encroutements bien consolidés, et d'après leurs compositions chimiques et minéralogiques, le processus majeur de dissolution c'est une décarbonatation partielle des carbonates car d'après, (Bourrie et al., 2008) la solubilité des roches carbonatées est très faible dans l'eau pure, en revanche elle augmente de plusieurs ordre dans l'eau acide, car c'est le caractère acide qui peut fournir l'agressivité vis-à-vis des carbonates. Selon l'expérience de (Stchouzkoy-muxart, 1971 in Ek, 2006) la vitesse de dissolution de la calcite augmente proportionnellement avec la teneur de l'eau en CO₂ et inversement proportionnel avec la température de l'aire, c'est-à-dire, dans les zones chaudes le plus de CO₂ est dans l'aire, par contre dans les zones froides, les eaux sont les plus riche en CO₂ et par conséquent, les plus grandes grottes calcaires sont recherchés dans les zones froides

D'après (Ek, 2006), Lorsque les fissures initiales à la surface et dans la formation Mio-pliocène sont élargies, l'eau peut circuler plus vite et avec l'augmentation de la vitesse des débits lors des crues, les actions mécaniques font leurs apparitions. D'après (Mathevet, 2002), l'érosion mécanique interagit étroitement avec la dissolution, puisque l'élargissement de certains vides augmente la circulation d'eau et facilite la dissolution et inversement.

D'après (Parriaux, 2009), l'altération génère une porosité dans des milieux originellement non poreux qu'on appelle porosité secondaire, et provoque une réduction systématique dans la résistance mécanique du matériel altéré. Donc et d'après (Gilli, 2008), la circulation d'eau dans des matériaux meubles peut entrainer les éléments fins et évider localement le terrain. Ses effets peuvent alors être plus importants et plus rapide par vidange brutal du remplissage préexistant. Dans le cas de M'rara, une action d'érosion et de creusement a eu lieu par les infiltrations des écoulements superficiels et principalement par la circulation souterraine dans la formation Miopliocène faiblement consolidée. L'érosion provoque ainsi la dissociation des composants insolubles de la formation et donc les emportés par les eaux tumultueuses des crues. A cause de la variation de la dureté, les deux formations ; Mio-pliocène et quaternaire ont subis une altération différentielle, de sorte que, l'érosion a été moins active dans les conglomérats et les croutes calcaires biens cimentés.

Le diagnostic des effondrements caractérisant la région de M'rara a été sanctionnée par la réalisation de ce modèle (Fig.65), qui explique bien la genèse des effondrements à M'rara.



Fig. 65: Coupes synthétique, échelles non respectées, montrant le modèle De formation des effondrements, dans la région de M'rara.

I. 2. Discussion de l'effondrement de Tafziouine

L'étude de la coupe géologique du sondage Haoud H'ssane, réalisé dans la région de Guerrara, nous montre, que la couverture continentale du sable Mio-pliocène repose directement sur l'éocène à formation carbonaté calcaire. (Fig.66).



Fig. 66: Tafziouine avant l'apparition de l'effondrement

Donc, l'effondrement serait causé par l'infiltration des eaux provenant du forage de Tafziouine (**Fig.67**), qui ont déclenché par pression hydrostatique, le phénomène. L'explication la plus plausible nous mène à dire, que l'éocène carbonaté est affecté par des cavités liés directement au développement de la karstification. Il se caractérise par la dissolution des carbonates sous l'effet des eaux d'infiltration. Probablement que la karstification était active lors des périodes pluvieuses, qu'a subit le Sahara avant le dépôt du Mio-pliocène. Cette explication tient lieu, puisque certaines forages réalisés dans la même région d'El Guerrara ont subit une perte totale qui coïncide avec la formation carbonatée de l'éocène. (A.N.R.H., 1999)



Fig. 67 : Le forage de Tafziouine, artisien jallissant

L'étude de l'effondrement de Tafziouine nous a permet de proposer le modèle suivant **(Fig.68)**, qui montre bien l'origine de l'effondrement.



Fig. 68: Coupe géologique schématique, échelle non respectée montrant l'hypothèse d'une karstification de l'éocène carbonaté

I. 3. Discussion de l'effondrement Sahb-Elbir

L'effondrement de Sahb-Elbir, peut avoir deux origines possibles ;

✤ Soit une origine naturelle ;

L'effondrement serait un phénomène naturel, dont l'origine serait le développement d'un karst. L'existence de karst dans cette région est mise en évidence par le fait de perte de boue, parfois totale dans les différents forages pétroliers effectués dans la région ;

L'effondrement serait la dissolution d'une poche de sel individualisée. La dissolution de ces sels en conduit à un effondrement naturel ;

 Soit une origine anthropique ; par le creusement d'un puits artisanal profond, qui a subi un élargissement par les eaux d'infiltrations ou de ruissellements superficielles. Le travail sur l'effondrement de Sahb-Elbir a été conclué par l'établissement d'un modèle **(Fig.69)**, de formation expliquant l'origine représenté par l'hypothèse la plus fiable : la dissolution d'une poche de sel individualisé dans le sénonien salifère.



Fig. 69 : Coupes synthétique, échelles non respectées, montrant l'hypothèse d'une poche de

Sel individualisé

Conclusion générale

Le point commun de tous les effondrements qui affectent le Sahara septentrional c'est l'eau avec ses actions de dissolution et d'érosion. Il provoque une dégradation de la résistance mécanique des terrains traversés et génère une porosité secondaire dans les matériaux originellement non poreux. Ces effondrements expriment l'existence d'une circulation des eaux, et indiquent un phénomène de karstification plus important dans le passé qu'actuellement et suggère la présence d'un réseau souterrain de fissures ou de cavités souterraines anciennes. Probablement que la karstification était active lors des périodes pluvieuses, qu'a subit le Sahara avant le dépôt du Mio-pliocène. Cette explication tient lieu, puisque certaines forages ont subit une perte totale tel que le forage H_{10-42} à M'rara et d'autres forages à Guerrara.

La région de M'rara, fait partie du bassin sédimentaire du Sahara Nord-Est septentrional, dont les affleurements sont dominés par les formations sédimentaires, où on trouve des sables, des argiles, des calcaires, des gypses et des sables argileux. Ces formations sont en général horizontales à subhorizontales, d'où ils ont subit une faible tectonique, traduit par l'apparition des fissures et des diaclases de dimensions variables allant de quelques centimètres à plusieurs dizaines de mètres.

La région de M'rara marque les esprits par l'apparition des effondrements à la surface, des affaissements, des fissures, des bétoires et aussi par l'existence de cavités souterraines au niveau des dépôts Mio-pliocène, détectés par la géophysique. Dans la région de M'rara l'action érosive des eaux est associée constamment à l'action de dissolution, au fur et à mesure de l'écoulement et l'infiltration des eaux de Oued R'tem surtout lors des crues et les eaux d'irrigation albiennes chaudes à travers les vides et toutes les discontinuités existantes sur le terrain.

L'impact environnemental de ces effondrements est grave car ;

- Ils menacent la vie humaine, animale et aussi les terres agricoles ;
- Ils peuvent être des sources de contamination des nappes profondes et surtout la nappe phréatique, parce que ses gouffres sont utilisés comme des bassins pour recueillir les rejets et toutes décharges publics.
- Ils représentent une entrave face aux activités et au développement dans la région Saharienne

Les recommandations

Afin de cerner mieux le problème des effondrements dans le Sahara septentrional, il ya lieu de suivre toute un programme d'étude et de recommandations ;

Pour la région de M'rara

- Il est nécessaire d'adapter l'exploitation de l'albien aux besoins réel en eau de la région;
- Il est vivement souhaitable de favoriser dans la mesure du possible à la place d'irrigation par submersion, utiliser l'arrosage au goute à goute
- Une étude de protection du village de M'rara contre les crues est indispensable ;
- Exécuter une étude géophysique par la méthode de gravimétrie dont le but est de détecter l'existence et l'extension latéral des cavités souterraines ;
- Déterminer un périmètre de protection autour des effondrements recensés et les délimiter par une clôture ;
- Matérialiser sur le terrain par des piquets ou autres choses toutes les fissures et surveiller leurs évolution ;
- La mise en place d'un réseau de surveillance qui consiste à placer des balises pour détecter d'éventuels affaissements de terrain et faire également un levé topographique de la région ;
- La mise en place d'un réseau de surveillance piézométrique dans le complexe terminal et éventuellement dans la nappe phréatique ;
- Etablir une carte de géorisque de la région de M'rara.

Pour la région de Tafziouine

- Délimiter autour de l'effondrement par une clôture ;
- Appliquer une étude géophysique autour de l'effondrement afin de détecter et localiser les cavités souterraines et aussi de savoir la résistivité et l'épaisseur des formations géologiques et de leurs extension latérale ;
- Une étude hydrogéologique est indispensable qui nous permet de savoir le niveau piézométrique, le sens d'écoulement et le chimisme des eaux ;
- Surveiller l'évolution du cratère et la recherche des indices de surface autour de l'effondrement tel que les affaissements et les fissures.

Pour la région de Mansourah

- ✤ Un périmètre de sécurité est déjà fait autour de l'effondrement par une clôture ;
- Une étude géologique détaillée est indispensable qui va nous permettre de savoir la tectonique, la lithostratigraphie et l'environnement géologique qui entoure l'effondrement;
- Appliquer une étude géophysique autour de l'effondrement afin de détecter et localiser les cavités souterraines et aussi de savoir la résistivité et l'épaisseur des formations géologiques et de leurs extension latérale ;
- Surveiller l'évolution du cratère et la recherche des indices de surface autour de l'effondrement tel que les affaissements et les fissures.