

Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique
Université d'Oran

Faculté des sciences de la terre, de Géologie et d'Aménagement du Territoire
Département des sciences de la terre

Rapport :

Présenté pour l'obtention du grade d'un Master 2 en Géologie
Option : **Risques naturels et gestions**

Thème :

**Détection de cavités naturelles dans certains sous-sols vulnérables.
Apport de la Géophysique sur des sites de la région
d'Es-Sénia (Oran).**



Présenté par :

BOUDAUD SAKINA

Soutenu le 22 octobre 2013 devant la commission d'examen :

MANSOUR HAMIDI	Président.
MAHAMMED DJILALI	Encadreur.
HASSANI MOULAY IDRIS	Examineur.
KHENAFOU MUSTAPHA	Examineur.

Oran, 2013

REMERCIEMENTS

Tout d'abord je remercie **DIEU** le tout puissant qui m'a donné la santé, le courage, et la patience pour élaborer ce modeste mémoire.

Ma profonde gratitude à Monsieur **MANSOUR HAMIDI**. Maître de conférence à l'université d'Oran de m'avoir fait l'honneur de présider ce jury.

Je tiens à exprimer ma gratitude, et mon profond respect à Monsieur **MAHAMMED DJILALI**. Chargé de cours à l'université d'Oran, qui est mon professeur et m'a personnellement honoré en acceptant de m'encadrer. J'apprécie les bénéfices de ses connaissances, ses critiques et son expérience, ainsi que le sujet intéressant qu'il m'a proposé.

J'adresse mes remerciements à Monsieur **HASSANI. M. I.** Maître de conférences A à l'université d'Oran. Monsieur **KHENAFOU MUSTAPHA**. Chargé de cours à l'université d'Oran d'avoir accepté de faire partie du jury.

Sans oublier tous mes enseignants depuis ma première année Master. **Mr FOUKRACHE. M. Melle ABLAOUI A. Mr NADJI. M.**

Mes plus vifs remerciements s'adressent à celles et ceux qui m'ont aidé à chaque fois que j'ai demandé leur aide.

Tables de matières

Introduction général.....	1
---------------------------	---

Chapitre A : Cadre physique et géologique de la région d'étude.

1. Cadre géographique.....	2
2. Cadre morphologique et hydrologique.....	3
2.1. Morphologie du Plateau d'Oran.....	3
2.2. Hydrologie.....	3
3. Cadre géologique régional.....	3
3.1. Cadre géologique régional.....	3
3.1.1. Le substratum anté à synchro nappe.....	4
3.1.2. Le remplissage post-nappe.....	4
3.2. Géologie du secteur d'étude.....	6
3.2.1. Le Miocène supérieur.....	6
3.2.2. Le Calabrien grés-sableux (Plio-Pléistocène).....	6
3.2.3. Le Quaternaire récent (Pléisto-Holocène).....	6
4. Hydrogéologie.....	7
4.1. L'aquifère du Calabrien.....	8

4.2. L'aquifère des alluvions plio-Quaternaire.....	8
4.3. L'aquifère dans le secteur d'étude.....	8

Chapitre B : Description des cavités, Processus de formation et Risque engendrés.

I. Les types des cavités souterraines.....	9
II. Les risque liés aux cavités souterraines.....	9
1. Les affaissements.....	9
2. L'effondrement.....	10
2.1. Les facteurs de risque d'effondrement.....	11
3. Les fontis.....	11
4. Suffosion.....	12
III. Exemple : durée de formation des cavités souterraines dans les régions calcaires.....	12
IV. Processus liés à la dissolution de gypse.....	13
1. Le gypse : un matériau de risque.....	13
2. Quels sont les risques liés au gypse.....	15

Chapitre C : Apport de la géophysique.

<i>I. Méthodes géophysiques susceptibles d'être utilisées pour la détection des cavités.....</i>	<i>16</i>
I.1. La méthode électrique classique : méthode de résistivité.....	16
I.1.1. La résistivité électrique des roches.....	16
I.1.2. La méthode de résistivité.....	16
I.1.2.1. Principe.....	16
I.1.2.2. Dispositifs employés (Schlumberger et wenner).....	16
I.1.2.3. Techniques de mesures en méthode de résistivité.....	17
a) Sondage électrique.....	18

b) Profil de résistivité.....	18
I.1.3. Traitement des données électriques	18
I.2. Imagerie électrique (Tomographie).....	20
I.3. Radar ou GPR (Ground penetrating Radar).....	22
I.3.1. Introduction.....	22
I.3.2. Fonctionnement du GPR.....	22
II. Exemple pratique de détection des cavités par la méthode d'imagerie électrique.....	24
III. Exemple pratique de détection des cavités dans des sites de la région d'Es-Sénia_Oran (Mahammed D, et al. 2010).....	25
III.1. Par la méthode électrique.....	25
III.1.1. Contexte géologique.....	25
III.1.2. Problème posé après l'emploi de la géophysique électrique.....	27
III.2. Utilisation du géo-radar.....	28
III.2.1.Acquisition des données.....	28
III.2.2. Traitement des radargrammes.....	29
III.2.3. Test sur des canalisations enterées.....	29
III.3. Détection de cavités sur des sites projetés de constructions dans la région d'Es-Sénia-El Kerma (Oran).....	31
Conclusion.....	34
Références bibliographiques	

INTRODUCTION GENERALE

Introduction général :

La région d'Es-Sénia a connu ces dernières années un bouleversement important qui s'est traduit par l'occupation sur son aire par de très nombreux projets immobiliers. Cette mobilisation a concerné particulièrement des terrains dont les sols étaient épargnés jusque là par le béton. En effet, leur nature géologique spécifique peut engendrer par un processus activé par les agents météoriques, des cavités dont certaines sont visibles en surface.

Devant cet état de fait, des études de ce sous-sol plus poussées ont été rendues nécessaires et entreprises, afin d'identifier la nature géologique des couches superficielles, puis le processus menant à la formation de ces cavités, ceci afin de mettre en œuvre les outils d'investigation profonde de ces terrains. Ainsi, a-t-on eu recours à certaines méthodes géophysiques, dans le cadre d'une approche nouvelle de « contrôle non destructif CND » pour permettre de détecter les anomalies en rapport avec les cavités dans le sol, et préciser leurs caractéristiques.

C'est le but de ce travail de présenter une panoplie de certaines techniques géophysiques susceptibles d'être utilisées dans ce contexte, puis d'exposer certains résultats de terrains obtenus.

Les deux premiers chapitres traiteront des conditions physiques de la région, puis il sera exposé la description théorique des divers types de perturbations auxquelles sont soumis différents sols sous l'influence de différents agents, à partir desquelles elles aboutiront à la formation des cavités. Le dernier chapitre concernera la présentation de techniques géophysiques, dont certaines très récentes, et leurs possibilités d'application sur le site d'Es-Sénia, pour détecter et mieux décrire ces phénomènes, leur distribution spatiale, etc... Le but final est de permettre aux constructeurs d'en tenir compte dans leurs projets et d'y remédier par des solutions adéquates.

CHAPITRE A :

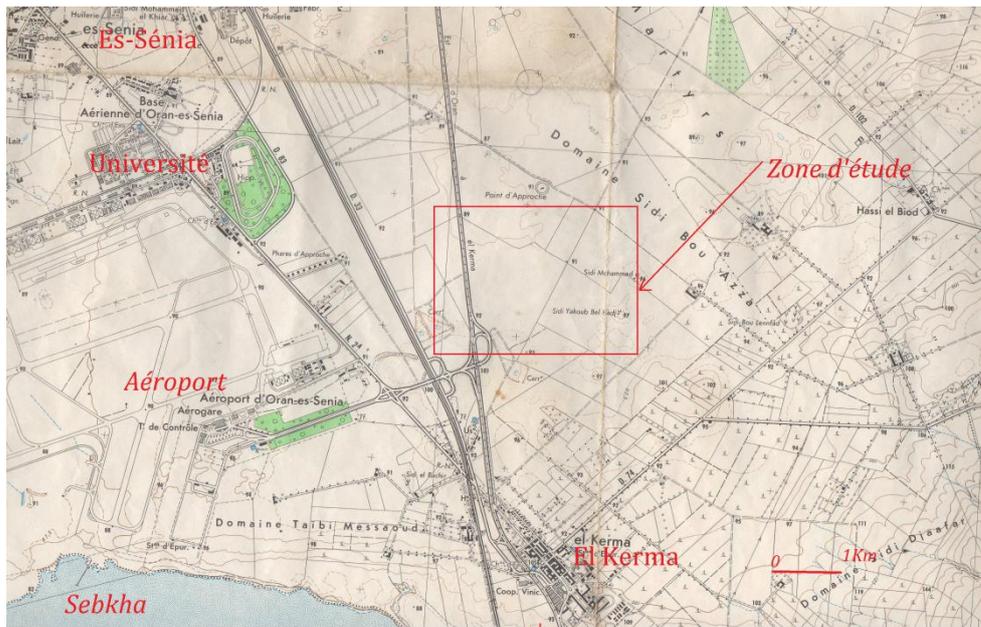
**Cadre physique et géologique de la
région d'étude.**

1- Cadre géographique :

Occupant la partie du N-W du plateau d'Oran, l'agglomération oranaise comprend la ville d'Oran (S.S) ainsi que les communes avoisinantes : Bir El Djir, Es-Senia, Hassi Bounif, etc. Le rôle socio-économique de cette agglomération est important dans nombre de domaines d'activité (*Fig n°01*).



Fig n°01 : Situation régionale de la zone d'étude.



720

Fig n°02 : Secteur d'étude.

La zone d'étude est située au sud d'Oran, entre les localités d'Es-Sénia et El Kerma, à l'est de la grande boucle routière qui permet de quitter l'autoroute et rejoindre l'Aéroport. Elle s'étend sur quelques dizaines d'hectares et est actuellement occupée par de nouveaux lotissements d'habitations (*Fig n°02*).

2- Cadres morphologique et hydrologique :

2-1- Morphologie du Plateau d'Oran :

La morphologie de la région d'Oran est représentée par trois sillons ; du nord vers le sud, on a :

- un sillon septentrional représenté par la plaine des Andalouses,
- un sillon médian (Plateau d'Oran – Grand Sebkhah) qui se prolonge vers l'ouest du sillon du bassin de Cheliff,
- un sillon méridional situé au sud des Monts de Tessala (plaine de Sidi Bel Abbas).

Le Plateau d'Oran, sur lequel se trouve notre site, est limité :

- ❖ Au nord, par la Mer Méditerranée, avec une côte formée de falaises abruptes et élevées.
- ❖ A l'ouest, par le versant sud du Djebel Murdjadjo, dont l'ossature est formée de formations d'âge secondaire.
- ❖ Au sud, par la grand Sebkhah d'Oran et à l'est, par le plateau de Bir El Djir ;

2-2-Hydrologie :

Le sillon médian défini précédemment détermine un bassin versant de type endoréique. Il est limité par la ligne de crêtes du djebel Murdjadjo et des Monts de Tessala, c'est le bassin de la Grande Sebkhah d'Oran. L'effet de l'assèchement du climat et la tectonique récente influence beaucoup l'organisation du réseau hydrographique de la région (Hassani M.I, 1987).

Dans notre secteur d'étude on distingue : la Dayat Morselly, qui se localise entre la zone industrielle d'Es- Sénia et le quartier du « Petit Lac » qui constitue son appendice. Cette Daya occupe une superficie de $1.38 \cdot 10^6$ m².

Les eaux pérennes sont rares car les eaux provenant des sources et celles associées au ruissellement de surface, se ré-infiltrant assez rapidement après une circulation de quelques centaines de mètres sur les calcaires Miocènes.

3- Cadres géologique et hydrogéologique :

3-1- Cadre géologique régional :

La région d'étude est incluse dans le domaine géologique du « Littoral oranais » qui fait partie de la zone externe ou tellienne. Ce domaine s'allonge sur une centaine de kilomètres entre la partie occidentale du Djebel Murdjadjo, à l'ouest, et les Monts d'Arzew, à l'est. Il s'étend sur une largeur moyenne d'une vingtaine de kilomètres. Il comprend dans le sens de la longueur un groupe de horsts (djebel Murdjadjo, djebel Khar, monts d'Arzew) constitués essentiellement de terrains d'âge secondaire. Ces horsts, très tectonisés, sont comblés d'une importante sédimentation post-nappe, constituée de terrain d'âge néogène et quaternaire. De nombreux travaux effectués, Gourinard (1958), Perrodon (1957), B. Fenet (1975), G. Thomas (1985), ont permis de distinguer deux grands ensembles structuraux (*Fig. n°3*).

3-1-1- Le substratum ante à synchro nappe :

Il affleure dans le Djebel Murdjadjo jusqu'à Madagh, dans le Djebel Khar et dans les Monts d'Arzew, représenté par des massifs schistosés autochtones d'âge Jurassique et Crétacé, fortement affectés par l'orogénèse alpine.

3-1-2- Le remplissage post-nappe :

Il a une forte extension dans les zones basses du domaine. Ce remplissage est continué par :

- Un Miocène 1^{ère} cycle: constitué par 250 m de dépôts continentaux de grés et conglomérats rouges
- Un Miocène 2^{ème} cycle, constitué par :
 - un niveau détritique de base formé de grés marins affleure uniquement dans les zones hautes,
 - des formations médianes constituées de marnes bleues qui sont très abondantes sous le plateau d'Oran et dans les Monts de Tessala où elles peuvent atteindre 600 m d'épaisseur,
 - des formations terminales formées au fond du domaine, par la série des Tripolis et la série de gypse
- Un Pliocène inférieur et moyen qui affleure dans les djebels Djira et Debbi, au sud d'El Braya,
- Les formations pleisto-holocènes : elles correspondent à un empilement de couches argilo-sableuses ou limoneuses, subhorizontales.

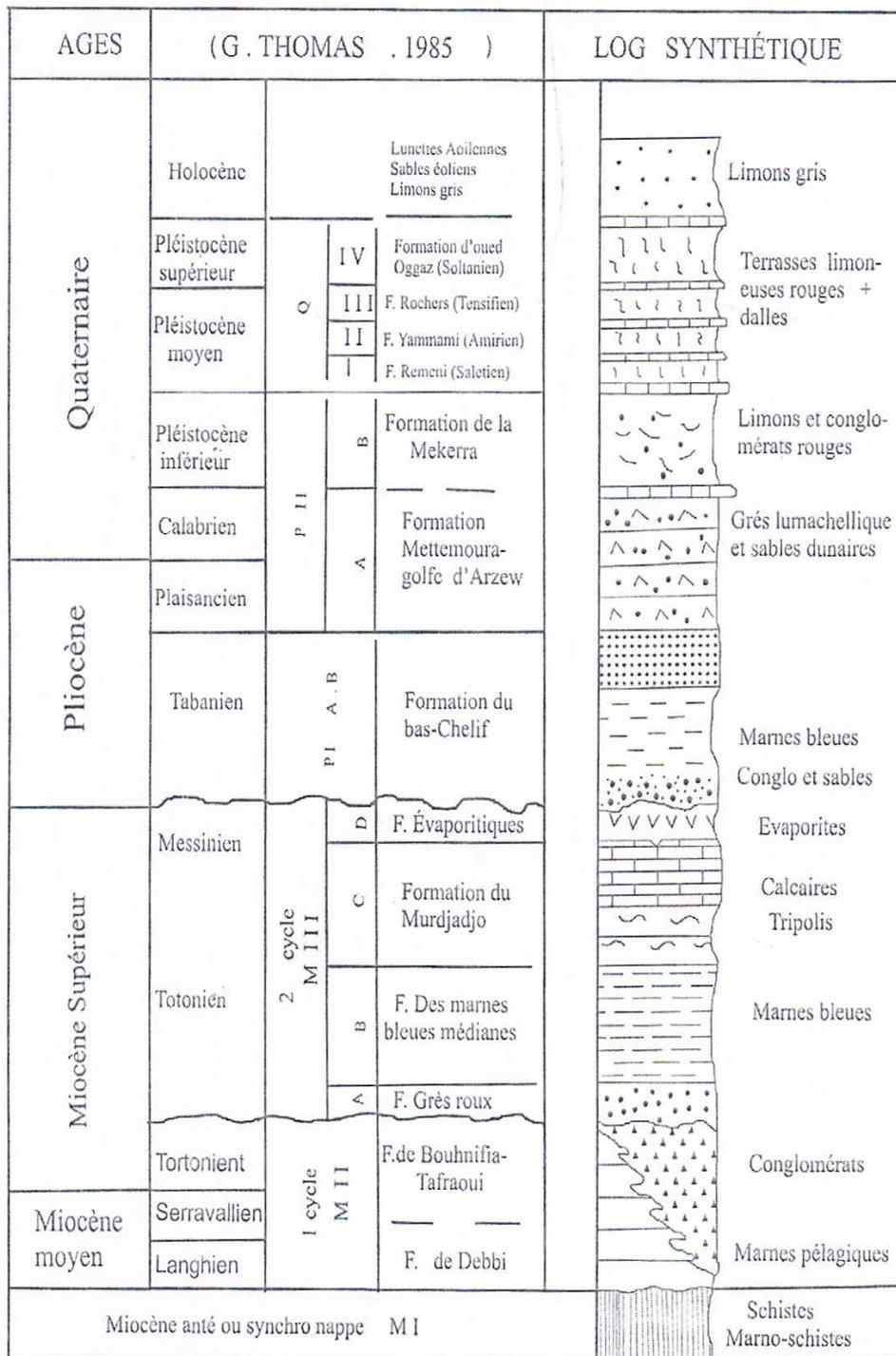


Figure n°3 : Log géologique synthétique la région d'Oran (Hassani M I, 1987. Extrait).

3-2-Géologie du secteur d'étude :

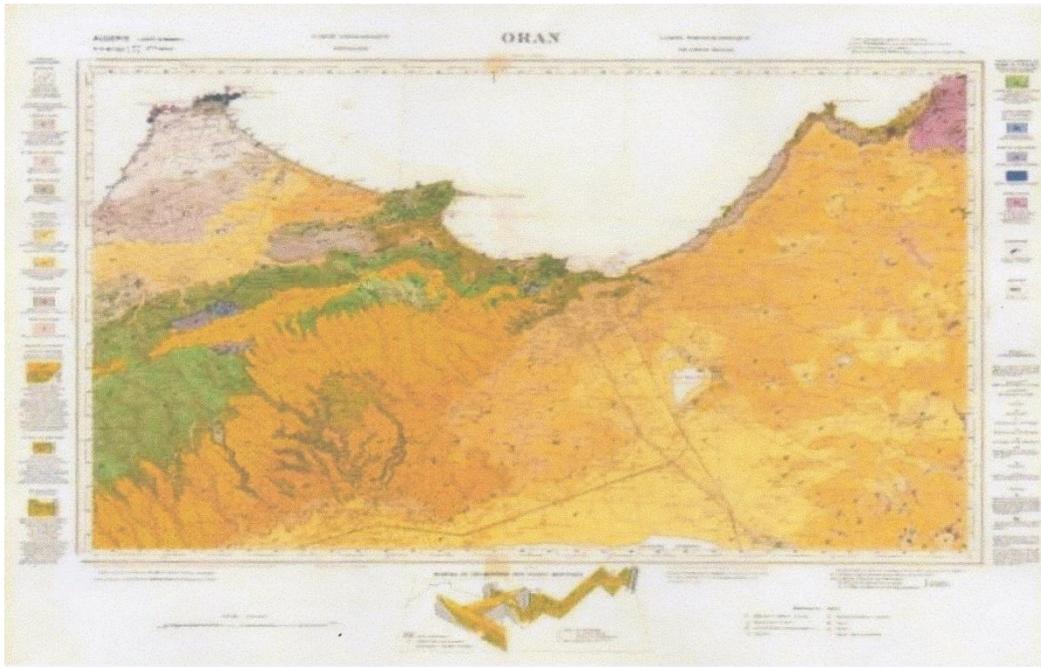


Fig n°4 : Carte géologique de la feuille d'Oran au 1/50 000. (Y. Gourinard, 1957).

3.2.1. Le Miocène supérieur :

Sous le Plateau d'Oran, le Miocène supérieur constitue la formation la plus ancienne. Il est représenté par des marnes grises ou verdâtres, litées.

3-2-2-Le Calabrien grés-sableux (Plio-Pléistocène) :

Le Pliocène inférieur et moyen qui affleure au sud d'El-Braya n'est pas représenté sous la partie nord du Plateau d'Oran. En profondeur, sa limite longe la bordure nord de la grande Sebka. Son biseutage permet aux formations des grés tendres et des sables du Pléistocène inférieure (Calabrien) de reposer en discordance directement sur les formations du Miocène supérieur.

La formation grés-sableuse du Calabrien affleure largement au nord-est de l'agglomération oranaise jusqu'à Canastel. Son épaisseur varie entre 15 et 25 m. Cet ensemble

se présente sous forme des dunes à stratification entrecroisée. Les sables sont plus ou moins grésifiés et contiennent des débris organiques d'origine marine.

3-2-3-Le Quaternaire récent (Pleisto-Holocène) :

Au nord, la surface du Plateau d'Oran est occupée par des dépôts du Quaternaire peu épais, formés d'argiles rouges de décomposition du Calabrien et des dépôts de ruissellement limono-sableux. Ces formations sont progressivement envahies vers le sud (vers la Grande Sebkhah), par une sédimentation plus épaisse et beaucoup plus fine (limons gris argileux).

Pas loin de l'aéroport, le sous-sol est constitué de gypse pur à 95%, l'épaisseur de ce dernier atteint 30 m

4- Hydrogéologie :

Le cadre géologique du secteur permet d'individualiser plusieurs systèmes aquifères plus ou moins interconnectés :

_ l'unité des grés et sables calabriens du Plateau d'Oran (plio-pléistocène), dans la partie nord-est de l'agglomération

_ L'unité des alluvions anciennes et récentes (Pleisto-Holocène) entre Oran et Es-Senia (*Fig. n°05*).

AGES	LOG SYNTHÉTIQUE	LOG HYDROGÉOLOGIQUE
Quaternaire	Limons gris	Semi Perméable
	Terrasses limon-euses rouges + dalles	
	Limons et conglomérats rouges	
	Grès lumachellique et sables dunaires	
Pliocène	Marnes bleues	Imperméable
	Conglo et sables	Perméable
Miocène Supérieur	Evaporites	Perméable
	Calcaires Tripolis	
	Marnes bleues	Imperméable
	Conglomérats	Perméable
	Marnes pélagiques	Semi Perméable
Miocène moyen	Schistes Marno-schistes	Imperméable
Miocène anté ou synchro nappe M I		

Fig n°05 : Log hydrogéologique de la région d'Oran

4-1- L'aquifère du Calabrien :

Vers le sud, le niveau piézométrique de la nappe suit l'allure de la topographie, l'écoulement se fait vers le sud-est, en direction de la Dayat Morselly. Les principaux puits et forages de l'agglomération oranaise sont foncés dans cette formation. Dans certains secteurs, la nappe peut devenir semi-captive sous les zones de recouvrement argileux : puits des abattoirs, etc...

4-2- L'aquifère des alluvions plio-quadernaires :

L'aquifère du remplissage plio-quadernaire s'étend au sud des affleurements calabriens. Il est constitué par des alluvions rouges à galets calcaires, suffisamment perméables et des alluvions récentes, essentiellement argile limoneuses provenant de dépôts fluviaux et éoliens des abords de la sebkha. L'aquifère plio-quadernaire renferme une nappe d'eau peu profonde.

La nappe est très exploitée, par forage et puits, pour des usages agricoles et industriels. C'est le cas dans les zones industrielles d'Es Sénia et de Hassi Ameur. L'eau de cette nappe est relativement minéralisée.

La nappe s'écoule en direction de la Dayat Morselly qui correspond à l'affleurement de la surface libre de la nappe où l'eau est reprise par évaporation.

Des mesures de perméabilité réalisées par essai Lefranc sur des sondages de reconnaissance du Plateau d'Oran et des Hassis (Agep-Sogreah, 1997) ont abouti aux résultats suivants :

Quaternaire

Argiles à gravier ou à horizon sableux ou gypseuse... $1,2 \cdot 10^{-7}$ à $2,4 \cdot 10^{-4}$ m/s.

Argiles rouges..... $1,3$ à $7 \cdot 10^{-7}$ m/s.

Silts..... $1,1 \cdot 10^{-4}$ m/s.

Sables fins, sables argileux, calcaires tufeux..... $9,4 \cdot 10^{-5}$ m/s.

Calabrien

Argiles sableuses et gréseuses..... $6,6 \cdot 10^{-6}$ m/s.

Sables argileux..... $1,1 \cdot 10^{-5}$ m/s.

Argiles et calcaires..... $1,1 \cdot 10^{-4}$ m/s.

4.3- L'aquifère dans le secteur d'étude :

La nappe est à une profondeur de 4 à 5m et sa minéralisation est très importante.

Chapitre B :

Description des cavités, Processus de formation et Risque engendrés.

I. Les types des cavités souterraines :

Nous devons distinguer différents types de cavités, en les classant selon leurs origines. Nous ne nous intéressons ici qu'aux cavités d'origine naturelle, celles d'origine artificielles (exploitations minières, abris militaires, caves et souterrains), ne rentrent pas dans le cadre de ce travail.

Ces cavités naturelles sont dues à la dissolution de matériaux par la circulation des eaux ; réseaux karstiques, poches de dissolutions dans les gypses ou dans les sels.

karsts, grottes, gouffres :

Ces cavités sont de nature très variée : karsts calcaire, poches de dissolution d'évaporites, gouffres de quartzites précambriens, cavités volcaniques, grottes marines ; elles sont dues, le plus généralement, à la dissolution de carbonates (calcaires, dolomies, craie ...) ou de sulfates (gypse ...) par des circulations d'eau au sein de la roche.

Dans le gypse, la vitesse de dissolution reste significative et une cavité est susceptible d'évoluer rapidement, en particulier dans le cas de reprise de circulations d'eaux.

cavités de suffosion :

Il s'agit de cavités liées à des phénomènes d'érosion interne générées par des circulations d'eau souterraines. Dans les formations sédimentaires meubles, des écoulements d'eau souterraine peuvent dans certains cas provoquer l'entraînement des particules les plus fines (sables fins et silts), favorisant ainsi le développement de vides très instables, de petites dimensions mais pouvant parfois atteindre plusieurs m³. Les matériaux entraînés sont évacués soit par les fissures ouvertes d'un horizon rocheux proche, soit dans une cavité voisine (vide karstique, cave, ouvrage d'assainissement, fuyard etc...).

II. Les risques liés aux cavités souterraines :

Les cavités se concrétisent par des effets de surface, avec des extensions qui leurs sont dépendantes : les affaissements et les effondrements généralisés, les fontis, les suffosions.

1-Les affaissements :

Il s'agit d'une déformation souple sans rupture et progressive de la surface du sol, se traduisant par une dépression topographique en forme de cuvette. Il s'agit souvent d'un phénomène symptomatique des carrières souterraines soit mal remblayées soit, lorsqu'elles sont profondes, recouvertes par des formations " souples ". Ces affaissements ont pour résultats des fissurations des ouvrages existants, des ruptures de canalisations etc. (**Fig n°06**)

Les affaissements peuvent générer des désordres sur les constructions mais provoquent peu de victimes physiques en raison de la progressivité du phénomène (phénomène "lent" permettant d'évacuer l'édifice).

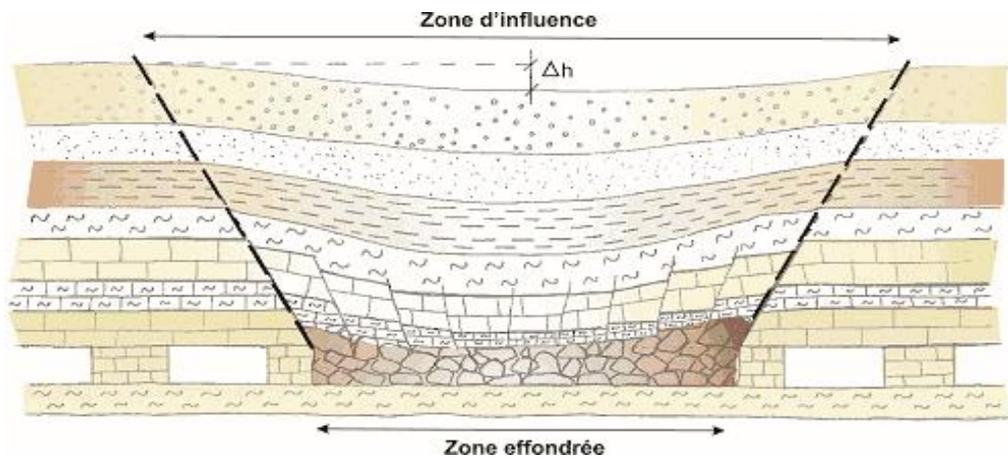


Fig n° 06 : Schéma d'un affaissement.

2- l'effondrement :

Ce phénomène se traduit par un abaissement à la fois violent et spontané de la surface sur parfois plusieurs hectares et plusieurs mètres de profondeur, tout le terrain au dessus de la cavité s'effondrant d'un coup. La zone effondrée est limitée par des fractures subverticales.

Ce type de phénomène peut générer des dégâts considérables aux constructions (y compris aux plus importantes) et provoquer un risque important de victimes physiques en raison de la rapidité et de l'importance du phénomène. (**Fig n°07**)

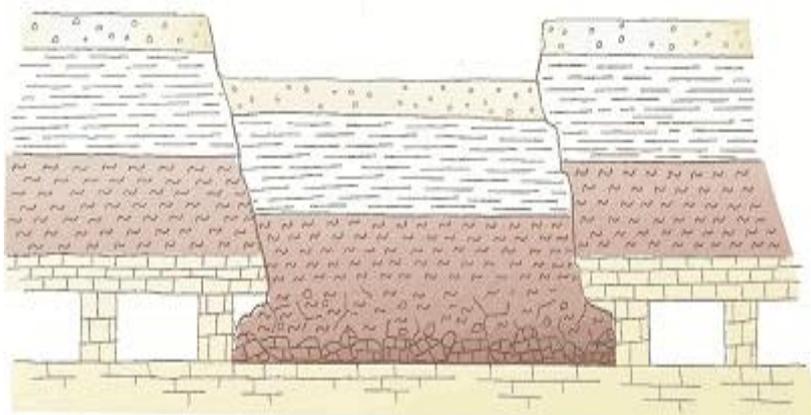


Fig n°07 : Schéma d'un effondrement généralisé de carrière.

2.1.Les facteurs de risque d'effondrement :

Ce risque peut être exacerbé :

- ❖ dans les zones sismiquement vulnérables.
- ❖ dans les zones où l'eau souterraine circule beaucoup et rapidement ou là où elle serait plus acide, ou en situation de remontée de nappe phréatique (fréquente après l'arrêt d'activité de carrières situées sous le niveau supérieur d'une nappe, quand les pompes de dénoyage sont arrêtées)

3- Fontis :

Le fontis correspond à un effondrement brutal mais localisé se manifestant sous la forme d'un entonnoir ou d'un cratère. Il est le plus souvent provoqué par la rupture progressive du toit d'une cavité, une cloche remontant plus ou moins lentement vers la surface jusqu'au développement brutal d'un cratère. Les fontis présentent souvent une géométrie pseudo-circulaire dont le diamètre et la profondeur du cône peuvent aller jusqu'à plusieurs mètres. (*Fig n°08*)

- Ce type de phénomène peut être à l'origine de dégâts importants aux ouvrages et est associé à un risque élevé de victimes physiques en raison la rapidité et des dimensions du phénomène. (*Fig n°09*)

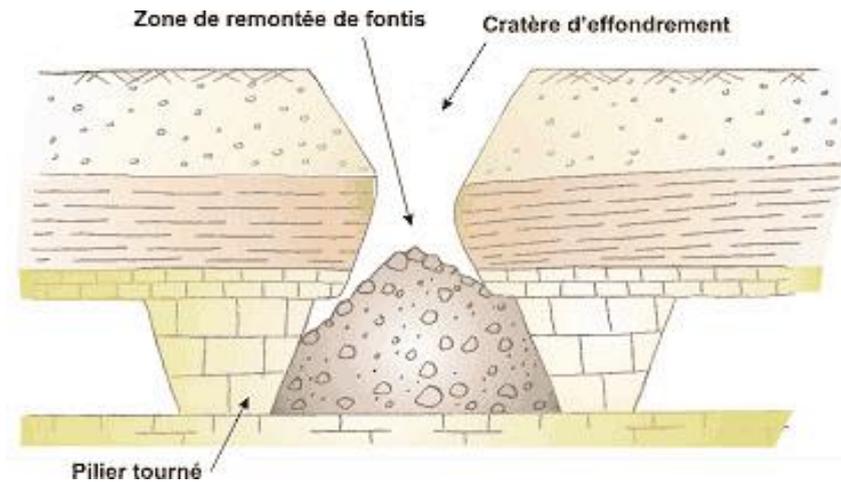


Fig n°08 : Schéma d'un fontis par rupture du toit d'une carrière.



Fig n°09 : Fontis sur un plateau agricole en Picardie (photo BRGM.)

4-Suffosion :

Il s'agit d'un phénomène d'érosion interne qui affecte principalement les sables et limons. Cela consiste en un entraînement des particules (d'abord assez fines) dans la masse de sol du fait de circulations rapides d'eau interstitielle. Le terrain est alors localement soustrait d'une partie de sa matrice fine, de véritables boyaux pouvant se développer (le diamètre de ces boyaux reste généralement modéré - diamètre décimétrique). Lorsque la taille de ces vides devient trop importante, des effondrements brutaux de terrain peuvent localement survenir entraînant souvent des désordres en surface.

-La suffosion peut être provoquée par une circulation naturelle d'eau, mais elle est plus fréquente au droit de canalisations enterrées fuyardes.

III. Exemple : durée de formation des cavités souterraines dans les régions calcaires :

Le calcaire est principalement formé de carbonate de calcium : la calcite CaCO_3 . L'un des mécanismes d'érosion des sols et de formation des cavités en milieu calcaire est la dissolution de la calcite par l'eau de pluie. Le calcaire, légèrement soluble dans l'eau pure, l'est beaucoup plus si l'acidité de la solution augmente.

Evaluation de la durée de formation d'une cavité dans un massif calcaire :

On désire, dans cette partie, faire une évaluation de la durée typique nécessaire au développement d'une cavité dans une région calcaire.

On suppose pour cela que dans la région étudiée, la solubilité en $\text{CaCO}_3(\text{s})$ est de l'ordre de 200mg. L^{-1} que la pluviosité annuelle est de l'ordre de 1200 mm par an et qu'en raison de l'évaporation et de la transpiration des végétaux seulement 70% des précipitations participent à l'écoulement des eaux.

La masse maximale de $\text{CaCO}_3(\text{s})$ que l'on peut dissoudre en une année est de :

Une surface au sol égal à 1m^2 reçoit 1200L d'eau ; $1200 \cdot 0.7 = 840\text{L}$ s'infiltreront dans le sol.

Masse de CaCO_3 dissoute : $0.2 \cdot 840 = 168\text{g}$.

Connaissant la masse volumique $\rho = 2600\text{Kg. m}^{-3}$; calculer le volume de $\text{CaCO}_3(\text{s})$ dissous par an toujours pour 1 m^2 de surface au sol.

$$2600\text{Kg. m}^{-3} = 2.6\text{g/ml} \text{ puis : } 168/2.6 = 64.6\text{ml} \quad 6.5 \cdot 10^{-5} \text{ m}^3$$

En déduire l'épaisseur de roche qui disparaît en une année.

Cette grandeur est appelée « ablation » par les géologues, elle s'exprime en mm/an.

$$6.5 \cdot 10^{-5} \text{ m/an} = 6.5 \cdot 10^{-2} \text{ mm/an.}$$

Evaluer enfin la durée nécessaire à la formation de cavités de l'ordre du mètre en ne prenant en compte que ce processus

$1/6.5 \cdot 10^{-5} = 1.5 \cdot 10^4$ ans, durée courte par rapport aux temps géologiques qui s'expriment en millions d'années.

IV. Processus liés à la dissolution de gypse :

1. Le gypse : un matériau de risque :

Le gypse, produit naturel, est la matière première du plâtre et est également utilisé pour l'élaboration des ciments, plus marginalement dans des applications diverses comme l'agriculture, la fabrication du verre et le traitement des eaux. Il a été largement exploité à ciel ouvert mais aussi en souterrain.

Les éléments constitutifs de gypse pouvant réagir avec l'eau, les caractéristiques mécaniques de la roche gypseuse vont dépendre essentiellement de l'action de l'eau (ruissellement, humidité) aussi bien en carrière abandonnée que dans les fractures naturelles affectant les couches de gypse. (*Fig n°10*)

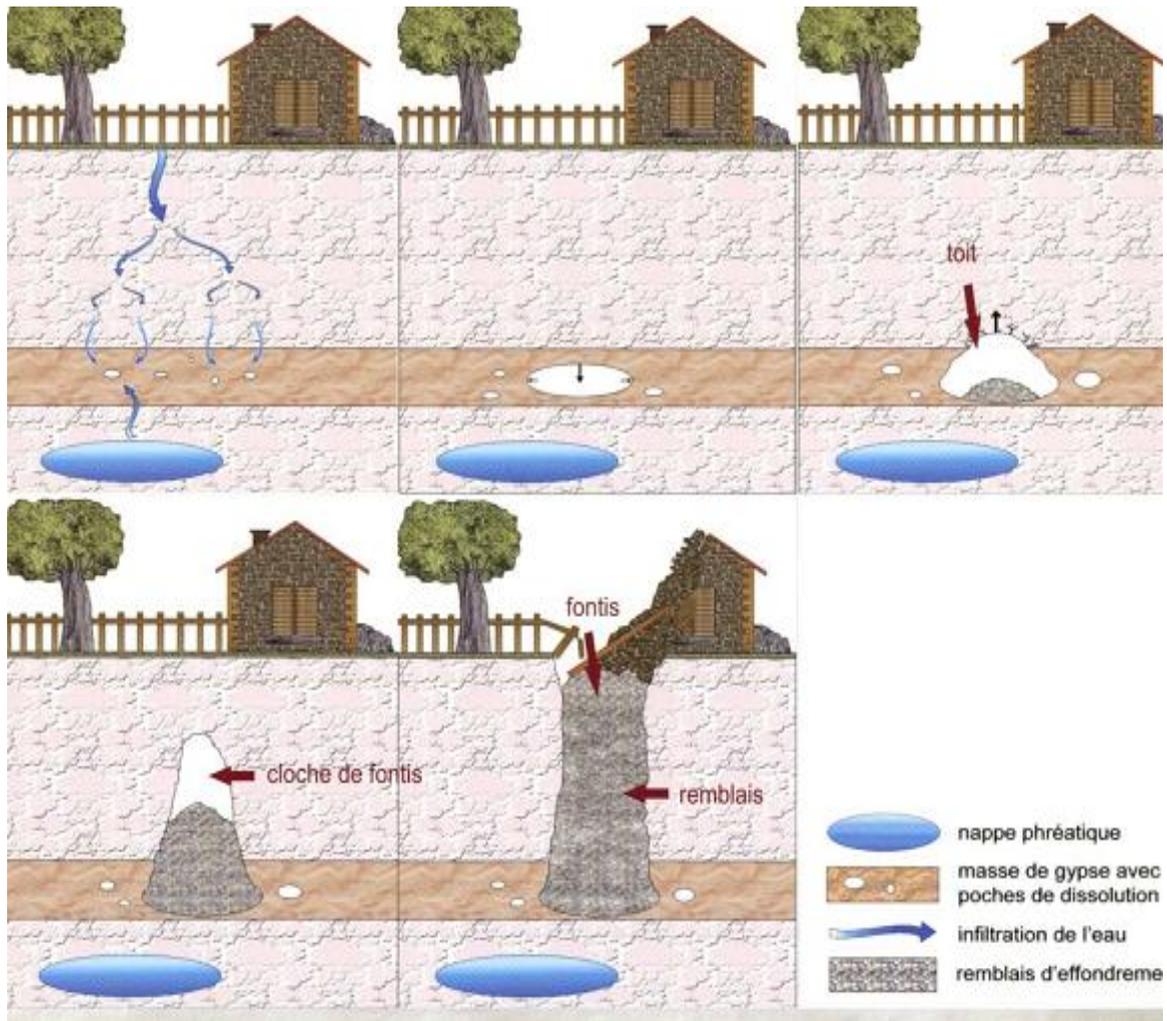


Fig n°10 : Le mécanisme d'un fontis dû à la dissolution du gypse.

L'infiltration d'eau et les remontées d'eau des nappes phréatiques dissolvent le gypse créant aussi des poches de vide. La propagation se fait dans un premier temps de manière horizontale jusqu'à ce que la largeur de la poche de vide devienne excessive par les roches composant le toit. Puis, la propagation s'effectue de manière verticale créant la cloche du fontis. Dans le cas où le volume des vides est faible, celui-ci se colmate et on assiste à une décompression plus ou moins importante en profondeur. Dans le cas contraire, le fontis se propage jusqu'en surface, engendrant des mouvements de terrains pouvant endommager les infrastructures présentes.

2. Quels sont les risques liés au gypse :

- ✓ L'effondrement de terrain, de 1 à 3 mètres de diamètre et parfois plus d'un mètre de profondeur, lorsque les cavités naturelles sont importantes et à faible profondeur.
- ✓ L'affaissement de terrain, déformation de la surface, qui peut atteindre plusieurs décimètres, lorsque les cavités sont de petit volume, ou situées sous un recouvrement important (le foisonnement des terrains superficiels amortit alors la remontée du vide). (*Fig n°11*)



Fig n°11 : Affaissement d'un parc public.

Chapitre C :

Apport de la géophysique.

I. Méthodes géophysiques susceptibles d'être utilisées pour la détection des cavités :

I.1. La méthode électrique classique : méthode de résistivité

Une grande variété de résistivités caractérise les couches géologiques dans le sous-sol et chaque résistivité correspond à une roche ou un faciès, ce qui permet de connaître la structure profonde des terrains. La méthode de la résistivité tend à déceler la structure des couches souterraines et leur puissance au moyen de mesures électriques faites en surface.

I.1.1. La résistivité électrique des roches :

La résistivité d'une substance, de section et longueur unitaire, exprime son degré d'opposition au passage électrique. La résistivité électrolytique va dépendre de la qualité de l'électrolyte, donc de la résistivité de l'eau d'imbibition qui dépend de la quantité de sels dissous.

Elle va dépendre également de la quantité d'électrolyte, qui fait intervenir la porosité, la saturation, la texture.

I.1.2. La méthode de résistivité :

I.1.2.1. Principe : Le courant étant envoyé dans le sol par des électrodes extrêmes (A et B), le potentiel reçu entre deux électrodes M, N et on obtient une résistivité (ρ). Les mesures se font à l'aide d'un quadripôle électrique. On mesure la différence de potentiel (Δv).

I.1.2.2. Dispositifs employés :

Les quadripôles symétriques sont les plus souvent utilisés, et parmi eux, il y a les dispositifs *Schlumberger* et *Wenner*.

-Dans **le dispositif Schlumberger (Fig n°12)**. La distance MN est petite par rapport à AB, en général $MN < AB/5$. La résistivité apparente de la couche explorée est donnée par la formule suivante :

$$\rho_a = K \cdot \Delta v / I$$

➤ ρ_a : résistivité apparente en ohm.m

➤ **K** : coefficient du dispositif Schlumberger : $k = \pi \frac{AM \cdot AN}{MN}$

➤ Δv : différence du potentiel en millivolts.

➤ **I** : Intensité en milliampères

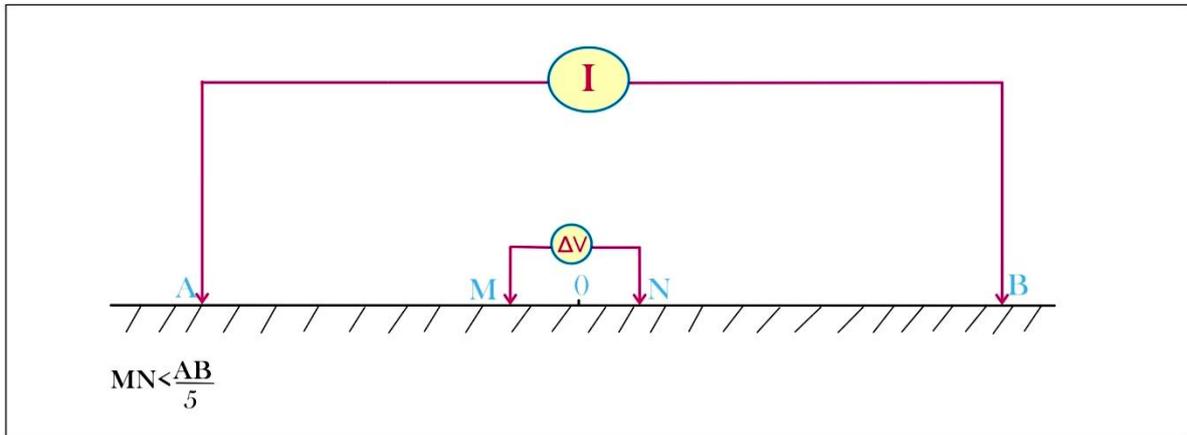


Fig n°12: Schéma de dispositif Schlumberger

-Dans le dispositif de Wenner (Fig n°13).les électrodes A, B, M et N sont équidistantes, telles que $AM=MN=NB=a$

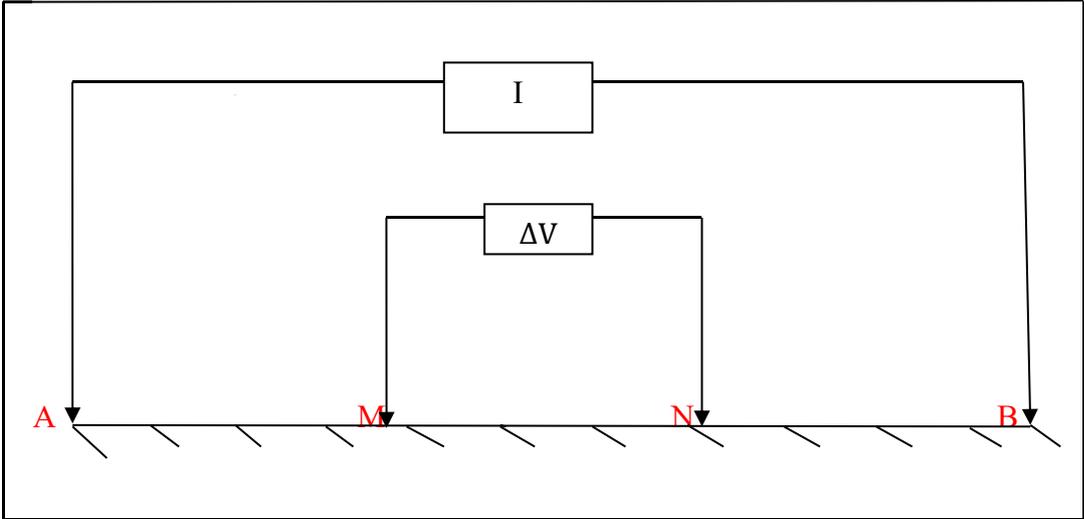


Fig n°13 : Schéma de dispositif Wenner

Le coefficient du dispositif est : $K= 2\pi a$

I.1.2.3. Techniques de mesures en méthode de résistivité :

. On cherche les variations de la résistivité soit en profondeur à la verticale par sondage électrique (S. E.V), soit latéralement par profil de résistivité. Deux techniques sont employées.

a) Sondage électrique :

Un sondage électrique est constitué par une suite de mesure de résistivité apparente (ρ_a), effectuées avec des lignes AB progressivement croissantes, le centre et la direction du dispositif restant fixes.

b) Profil de résistivité :

Un profil de résistivité consiste à mesurer la résistivité apparente ρ_a , en des points de mesures, alignées et régulièrement espacés. On appelle souvent ce dispositif « trainé électrique ».

Cela va mettre en évidence les variations latérales de la résistivité apparente, pour une certaine profondeur constante d'investigation.

1.1.3. Traitements des données électriques :

Les techniques modernes de résolution des courbes de sondages électriques (S.E.V), obtenues sur le terrain, et qui utilisent des programmes informatiques, suivent 2 approches :

-Par résolution du problème direct en faisant l'hypothèse sur un modèle de terrain, dont la courbe calculée sera rapprochée successivement de l'originale (méthode de modélisation).

-Par résolution inverse, c'est-à-dire en partant des mesures elles mêmes en déduire par une méthode directe le modèle qui en est la cause (méthode d'inversion).

Un programme informatique suivant cette procédure à été écrit (Mahammed, 1992), il s'agit pratiquement d'introduire suivant un certain échantillonnage les résistivités de la courbe de sondage. Ce programme va alors exécuter automatiquement la recherche du modèle géo électrique responsable de la courbe.

Nous pouvons illustrer ici par un exemple théorique d'une courbe empruntée à un catalogue d'abaque et correspondant à la succession (figure n°.....).

$$\rho_1 = 10 \text{ ohm m} \qquad h_1 = 1 \text{ m}$$

$$\rho_2 = 100 \qquad h_2 = 2$$

$$\rho_3 = 2 \qquad h_3 = 25$$

$$\rho_4 = 10 \quad \text{(I)}$$

L'opération s'articule ainsi :

-Introduction des valeurs échantillonnées des résistivités apparentes.

-Introduction d'une solution approximative (II) de la courbe de SE, en termes de résistivité vraies et d'épaisseurs des couches.

Le programme calcule alors la meilleure solution au sens d'un critère prédéfini. On obtient finalement au bout de cinq itérations la solution :

$$\rho_1 = 10 \text{ ohm. m} \quad h_1 = 0.996 \text{ m}$$

$$\rho_2 = 119.95 \text{ ohm. m} \quad h_2 = 1.63 \text{ m}$$

$$\rho_3 = 2.41 \text{ ohm. m} \quad h_3 = 29.95 \text{ m}$$

$$\rho_4 = 10 \text{ ohm. m} \quad \text{(III)}$$

Qui est une solution équivalente à la solution cherché (I) selon le principe d'équivalence

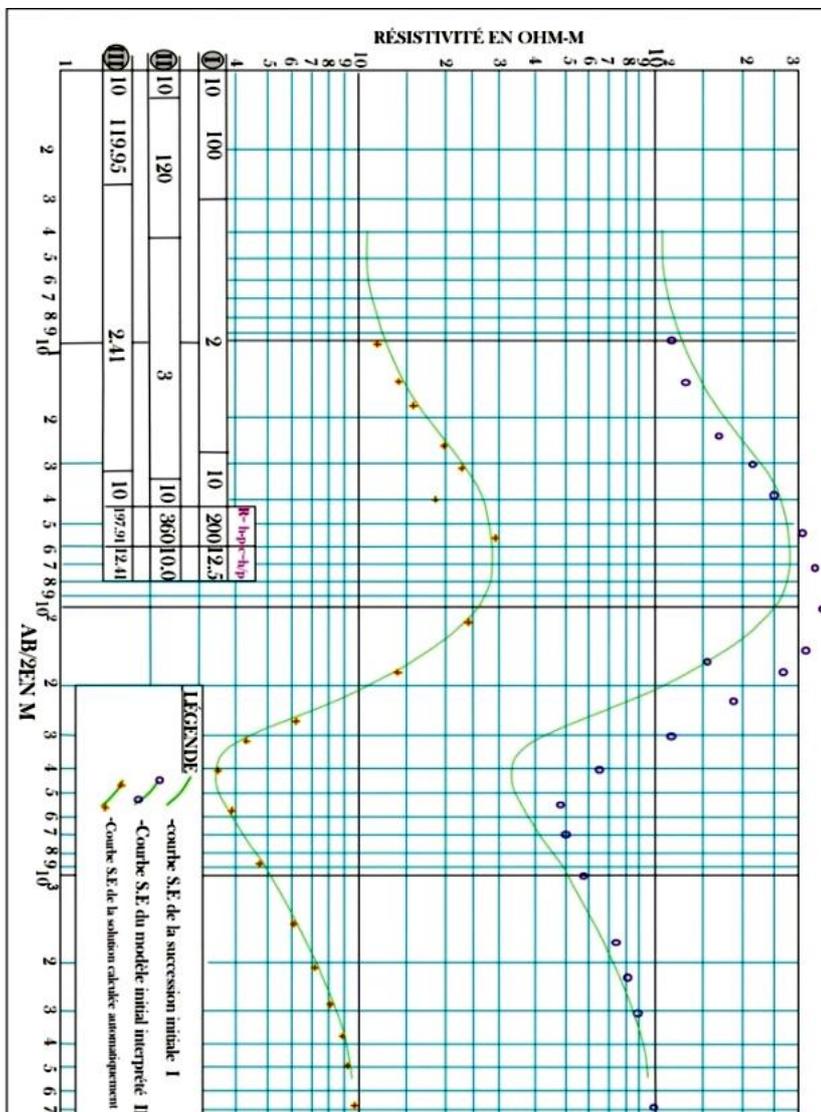


Fig n°14: Etape de résolution automatique, et recherche du modèle géo électrique responsable de courbe de sondage électrique. (Mahammed, 1992)

I.2. Imagerie électrique (Tomographie) :

Cette technique de mesure très récente (appelée également panneau électrique) consiste à obtenir une Image électrique du sous-sol pour différentes combinaisons d'électrodes de courant et de potentiel. Le nombre d'électrodes est de plusieurs dizaines plantées sur un même profil.

1^{ère} étape : construction d'un pseudo – section électrique (**Fig n°15**)

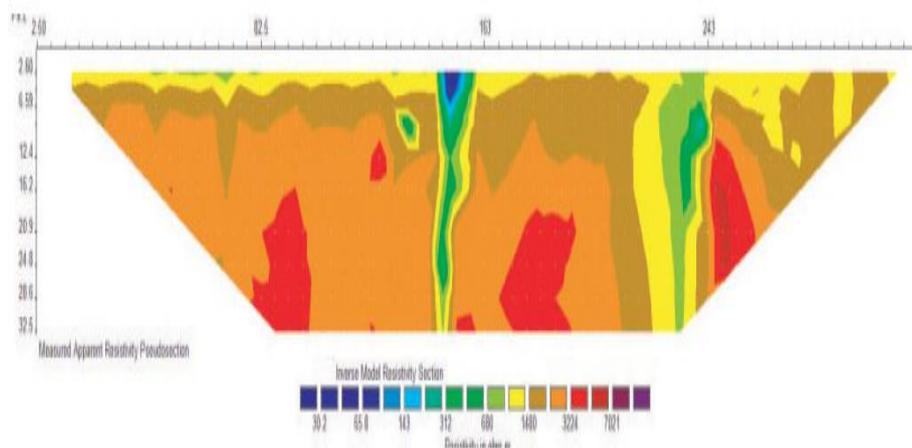


Fig n°15 : Carte de pseudo-section.

Il s'agit d'une carte de résultat qui présente les valeurs des résistivités apparentes calculées à partir de la différence de potentiel mesurée aux bornes de deux électrodes de mesure ainsi que de la valeur du courant injecté entre les deux électrodes d'injection. La couleur du point sur la pseudo-section représente donc la valeur de la résistivité apparente en ce point. Pour obtenir cette pseudo-section, avec la configuration Wenner, les mesures sont réalisées avec le quadripôle (1, 2, 3, 4) de la (Fig n°16) Le courant est injecté entre pôles 1 et 4, et le potentiel est mesuré entre pôles 2 et 3. Le calcul de la résistivité apparente se fait automatiquement et sera positionnée au premier niveau sous la surface. On représente ainsi l'ensemble des valeurs mesurées aux bornes de chaque quadripôle par des points, suivant une échelle de couleurs reliées aux valeurs de résistivités. La profondeur de ces points augmente avec l'écartement. Pour 16 électrodes placées sur un profil, par exemple, il existe 35 combinaisons possibles de quadripôles.

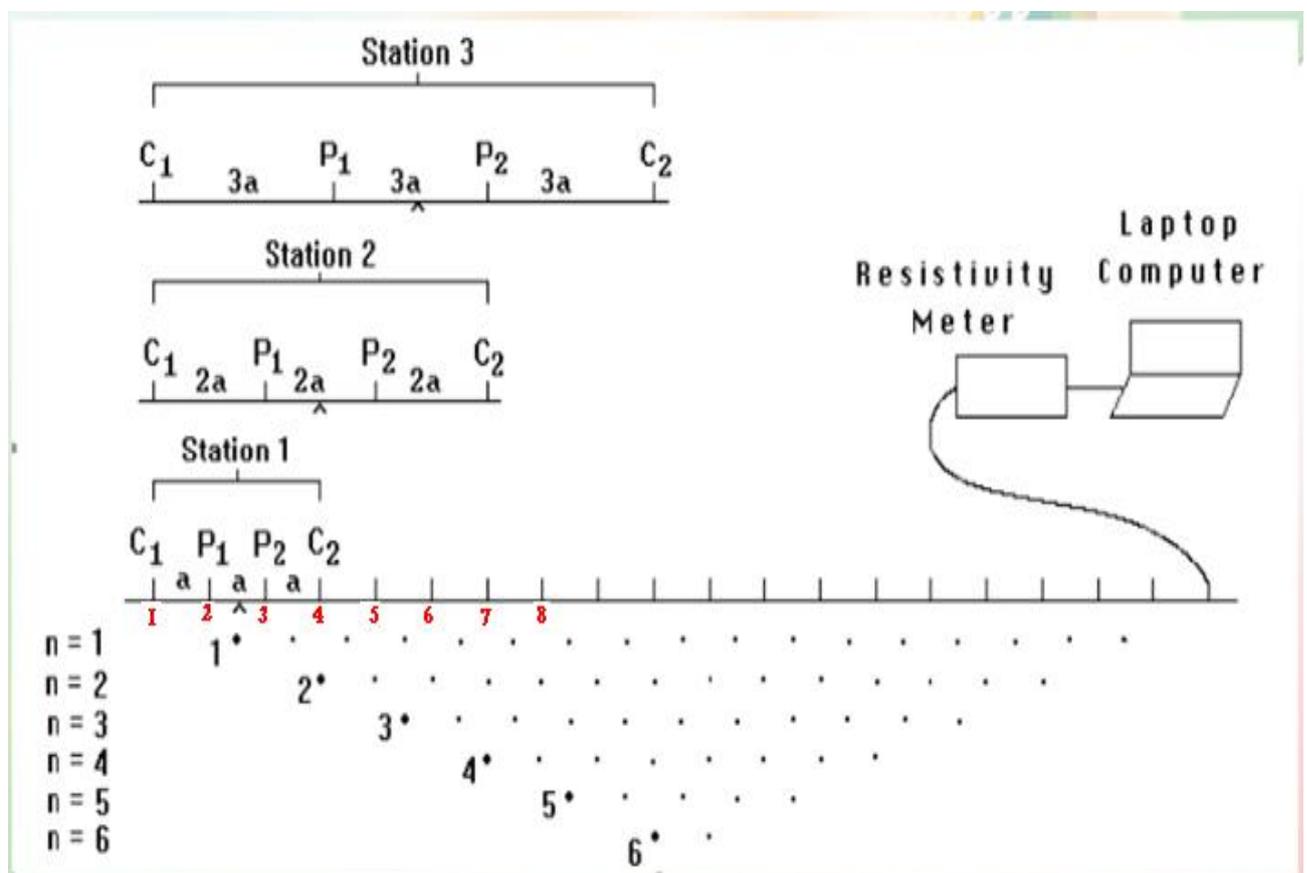


Fig n°16 : Dispositif de mesure en tomographie électrique.

2^{ème} étape Inversion de la pseudo-section : reconstitution par une méthode itérative des différents terrains en résistivités vraies et épaisseurs qui ont donné naissance aux résistivités apparentes de la pseudo-section. Ceci est exécuté par le logiciel Res2Dinv (Loke et al, 1996),

grâce à un processus itératif qui tente de minimiser l'écart entre le pseudo section mesurée et le pseudo section recalculée pour un modèle.

3^e étape : Le modèle est ainsi modifié jusqu'à ce que les données mesurées et calculées atteignent une concordance acceptable ou que plus aucune amélioration ne soit possible.

On obtient alors enfin, une image 2D du terrain (bas de *Fig n°17*) avec la variation des résistivités vraies des différentes formations.

Dans la suite, nous exposerons une application pratique de cette méthode dans le cas de la recherche de cavités.

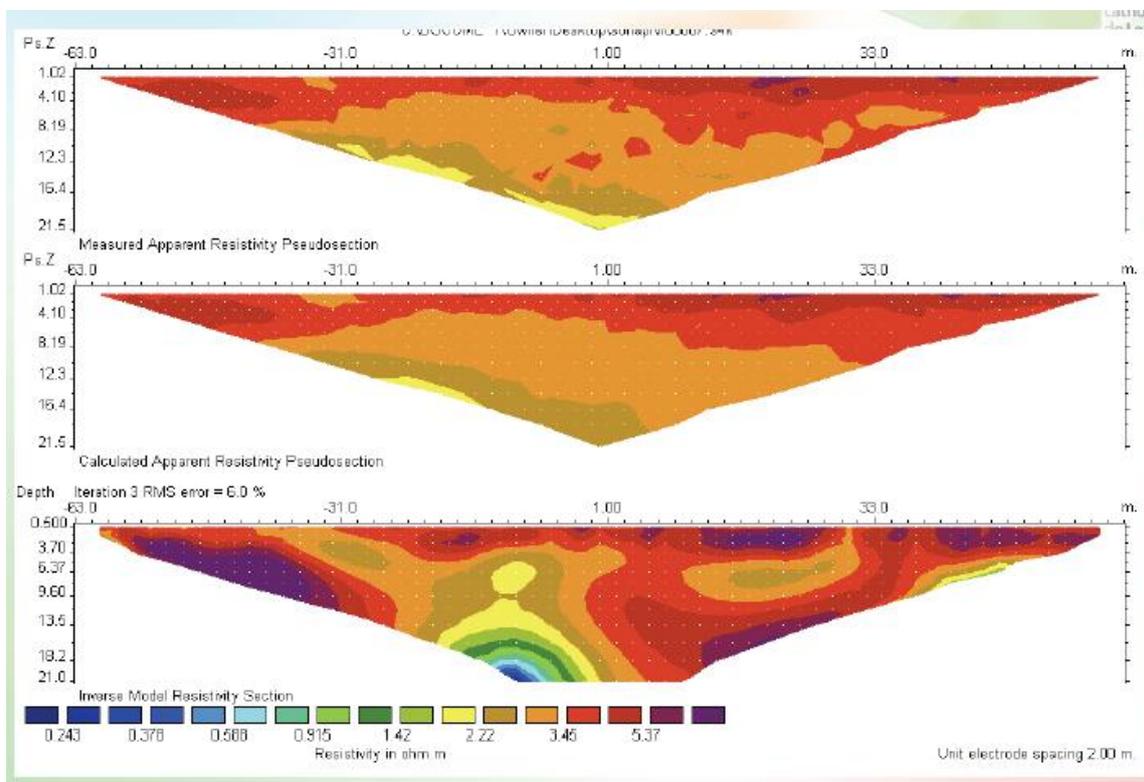


Fig n°17 : Etapes du traitement des données de la tomographie électrique.

I.3. Radar ou GPR (Ground Penetrating Radar):

I.3.1.Introduction :

Le GPR est une méthode relativement récente par rapport à l'ensemble des méthodes géophysiques. Cette technique permet l'investigation des premières dizaines de mètres sous la

surface du sol ; elle est capable de repérer, grâce à l'analyse de la réflexion des ondes électromagnétiques, des changements de nature géologique comme la stratigraphie, la fracturation et les accidents tectoniques (. Elle permet aussi d'identifier des changements de nature artificielle comme des objets métalliques ou archéologiques enterrés et des canalisations souterraines. (Davis et Annan, 1989).

En hydrogéologie, le GPR est employé pour localiser des zones fracturées et accidentées, des cavités souterraines, des zones karstiques.

Enfin le GPR est également souvent appliqué en milieu urbain pour la rapidité et la qualité des informations concernant le sous sol. C'est un outil de contrôle non destructif (CND) des ouvrages (chaussées, pistes d'aéroports, ouvrages en béton, etc...).

I.3.2. Fonctionnement du GPR :

Une antenne envoie à cadence élevée des ondes électromagnétiques dans le terrain sous la forme d'une impulsion de très courte durée. Les ondes sont captées après propagation dans le matériau ausculté et réflexion sur les cibles constituées par les discontinuités entre les différents milieux physiques. Ces cibles peuvent être par exemple : des cavités, des interfaces entre deux milieux différents, des armatures métalliques...

L'antenne émettrice-réceptrice est déplacée à vitesse lente et régulière le long de la surface à ausculter (sol, paroi,...). La coupe temps ainsi obtenue est transformée en coupe profondeur après détermination de la vitesse de propagation caractéristique du milieu. Le choix de la fréquence de travail détermine en partie la résolution et la profondeur d'investigation. Cette fréquence varie entre 50 Méga Hz et 1.5 Giga Hz.

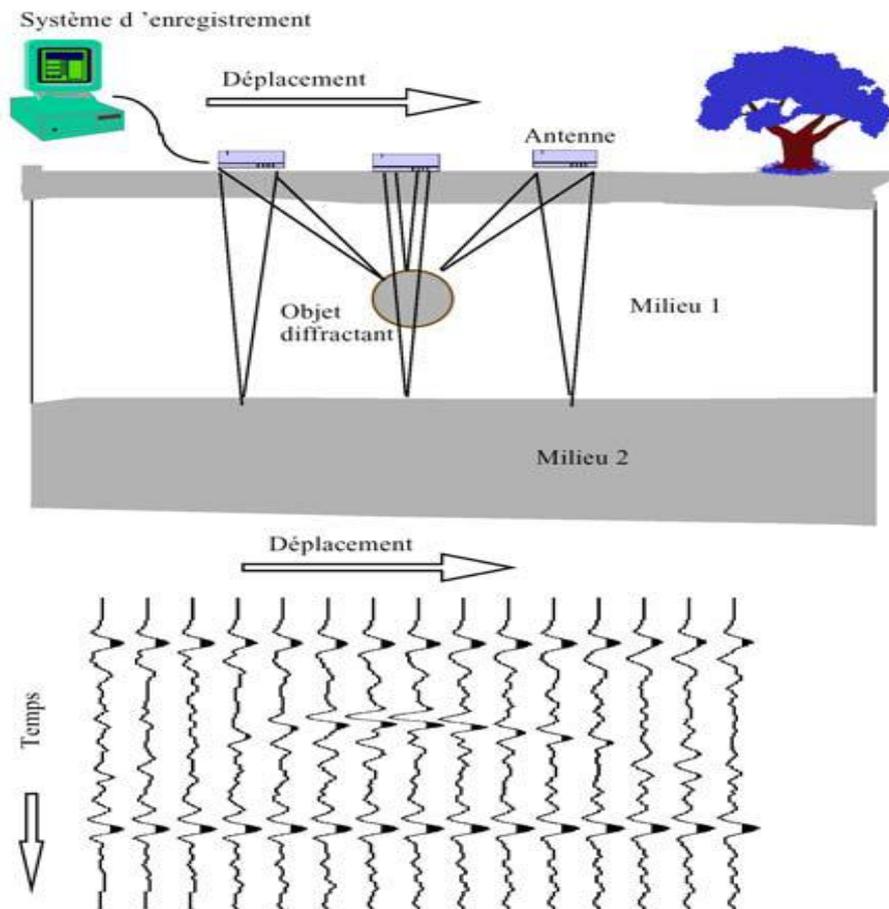


Fig n°18 : Schéma de principe de fonctionnement du GPR.

Fondé sur la propagation des ondes électromagnétiques dans les matériaux, plus le matériau est électriquement résistant, plus les ondes se propagent facilement et plus la profondeur d'investigation est importante.

Naturellement, les phénomènes que l'on désire mettre en évidence doivent être caractérisés par un contraste de propriété électromagnétique (constante diélectrique. ϵ'), par rapport au milieu encaissant.

On a la relation : $V = c / \epsilon'^{1/2}$

Où, V = vitesse de l'onde électromagnétique dans le terrain

c = vitesse de l'onde électromagnétique dans le vide (= 300.000 Km/s)

Matériel	Constante diélectrique (ϵ')	Conductivité σ (mS/m)	Vitesse V(m/ns)	Atténuation α (dB/m)
air	1	0	0.3	0
eau distillée	80	0.01	0.033	0.002
eau douce	80	0.5	0.033	0.1
eau salée	80	30000	0.01	1000
sable sec	3-5	0.01	0.15	0.01

sable humide	20-30	0.1-1.0	0.06	0.03-0.3
calcaire	4-8	0.5-2	0.12	0.4-1.0
marnes	5-15	1-100	0.09	1-100
silt	5-30	1-100	0.07	1-100
argiles	5-40	2-1000	0.06	1-300
granite	4-6	0.01-1.0	0.13	0.01-1.0
sel sec	5-6	0.01-1.0	0.13	0.01-1.0
glace	3-4	0.01	0.16	0.01

Tableau n°01 : Paramètres physiques pour certains matériaux géologiques.

La profondeur d'investigation est de quelques mètres, elle dépend des fréquences (plus la fréquence est basse, plus grande est la profondeur d'investigation). A titre d'exemple; la profondeur d'investigation peut être nulle dans un sol argileux, de plusieurs dizaines de mètres dans la glace ou des sables très secs.

II. Exemple pratique de détection de cavités par la méthode d'Imagerie électrique :

Nous avons choisi un exemple d'application de l'Imagerie dans le cadre de recherches de cavités dans un site urbain, au Maroc (El Khammari et al, 2007). Cet exemple permet de tester l'efficacité de cette méthode.

Le site est connu pour abriter des cavités souterraines naturelles, de type karstique, qui sont souvent à l'origine d'affaissements ou fontis. A la suite d'effondrements, il a été constaté qu'elles sont remplies d'air, de volume de plusieurs mètres cubes, et de toit variant de 0.8 à 5 mètres.

Les contrastes notables de propriétés physiques existant entre les cavités (remplies d'air) et leur encaissant offrent un contexte très favorable pour une caractérisation par les méthodes géophysiques.

Ainsi, la tomographie électrique et le radar ont été utilisés pour la détection et la limitation de ces cavités.

Mise en œuvre : la configuration adoptée pour les 48 électrodes espacées de 4m, est le Wenner. Deux profils ont été exécutés.

La **fig n°19**, montre les 3 étapes de l'inversion pour chacun des profils, et délimite des secteurs très résistants représentés par les couleurs allant du rouge au mauve, de tailles et profondeurs variables correspondant à de probables cavités.

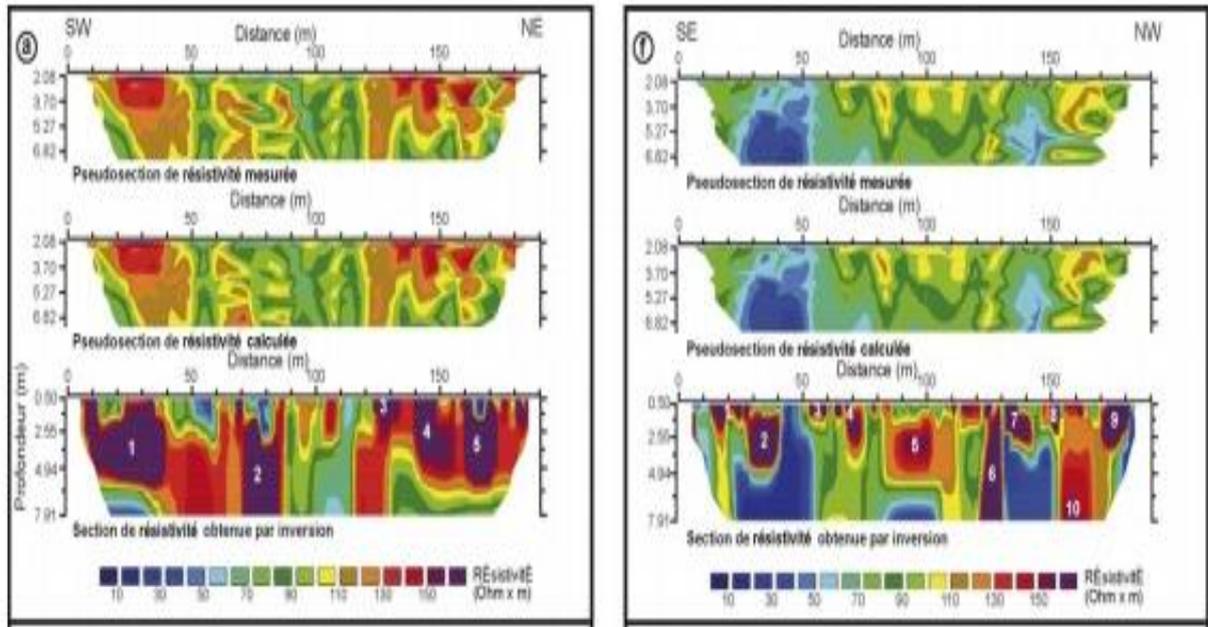


Fig n°19 : Profils de Tomographie électrique montrant les cavités. (El Khammari K. et al,2007).

III. Exemples pratiques de détection de cavités dans des sites de la région d’Es-Sénia – Oran (Mahammed D. et al, 2010).

III.1. Par la méthode électrique :

III.1.1 Contexte géologique :

La zone étudiée située à une dizaine de km au sud-est d’Oran, (**Fig n°20**) appartient au Quaternaire continental qui est représenté par des amas éoliens avec du gypse autour de dépressions inondées couvrant des alluvions. Des cavités sont visibles en surface dues au lessivage par les eaux superficielles des limons gris à cristaux de gypse.

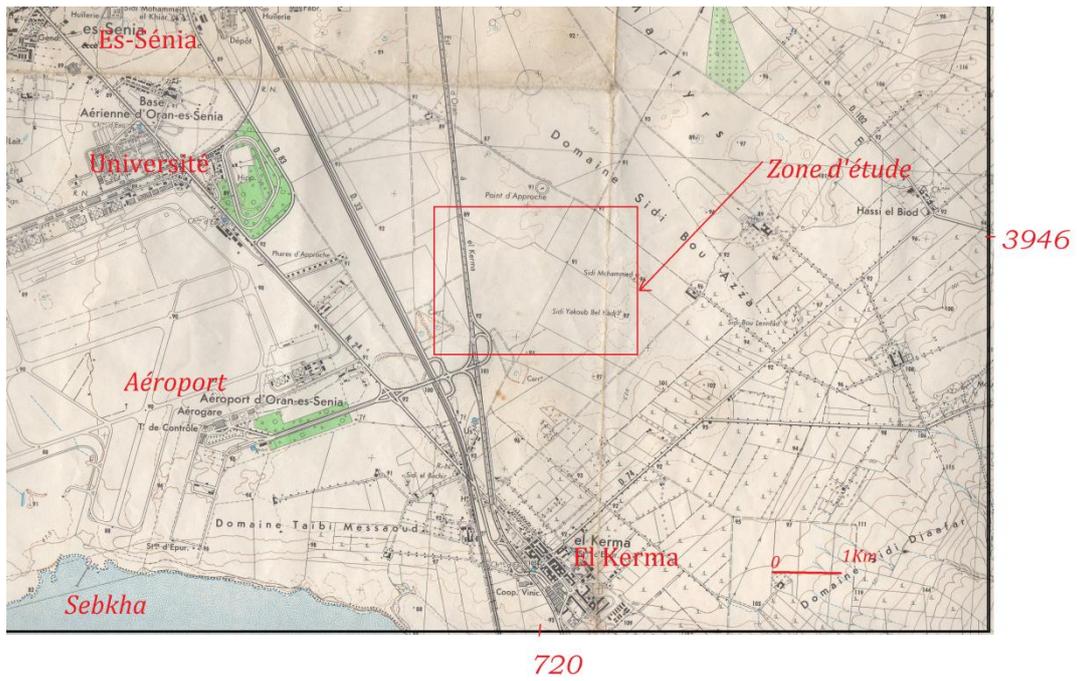


Fig n°20: Situation de la zone étudiée.



Fig n°21 : Tranchée dans le site montrant son assise représentée par les limons marno-gypseux.

III.1.2 Problème posé après l'emploi de la géophysique électrique :

Le recours à une méthode d'investigation légère a été motivé d'abord par le fait que le terrain peu praticable est recouvert par une végétation de plantes sauvages. En second lieu, quelques sondages électriques exécutés ont révélé en surface une couche de résistivité de l'ordre de 20 à 30 ohm.m, au-dessus d'un aquifère d'eau très salée détecté à 4 ou 5 m de profondeur. Le dispositif Wenner utilisé d'élongation totale égale à 15 m, a balayé une superficie de 2 à 3 hectares suivant des points de mesures et des profils espacés de 5 m. La longueur AB choisie devrait investiguer une tranche de terrain épaisse de 1.5 à 2.5 m, suffisante pour déceler les anomalies dues à la présence de cavités.

La carte d'iso- résistivités (**Fig n°22**) montre un allongement de structure de direction nord-est sud-ouest et un gradient de part et d'autre de la zone centrale mais cependant plus accentué vers le sud-est. En général, les valeurs s'étalent de 10 à 20 ohm.m avec cependant certains îlots anomaux, à l'ouest et à l'est, supérieurs à 20 ohmm

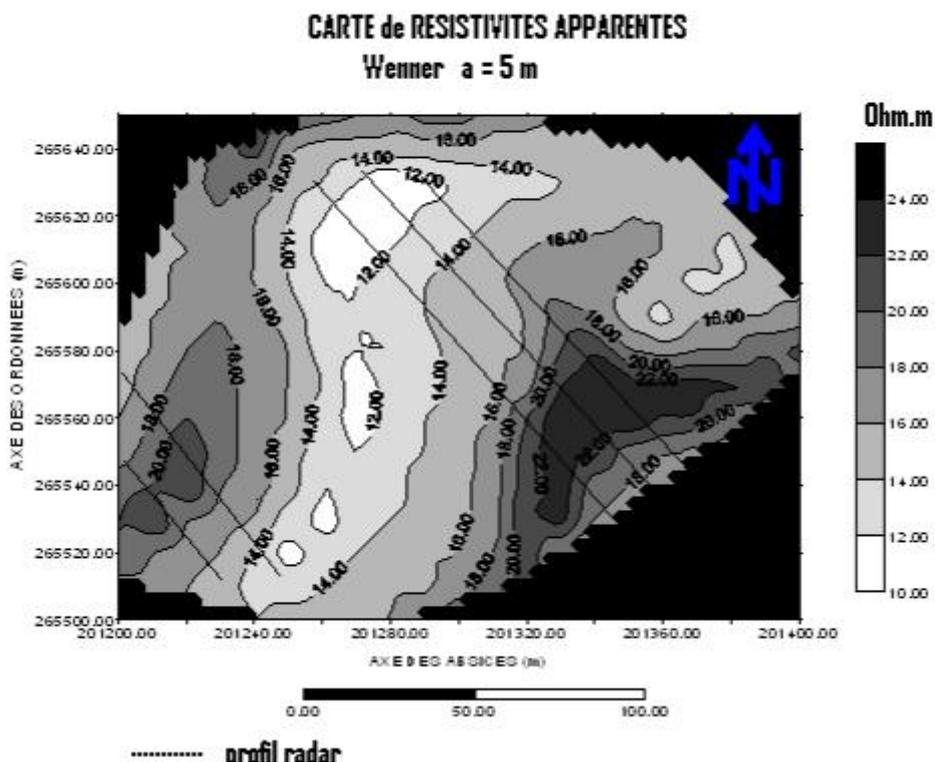


Fig n°22 : La carte de résistivité apparente.

Il a néanmoins été constaté en comparant les secteurs où apparaissent des cavités que les résultats présentés par la carte restaient insuffisants. En effet, les travaux de tranchées ont été entamés qui ont montré l'ampleur et le nombre de cavités présentant un vide qui s'engouffre jusqu'au niveau d'eau. Leur fréquence d'apparition semble se corréler avec les hautes résistivités, mais ceci n'est pas une condition suffisante pour marquer la présence de cavités.

En effet, celles-ci sont présentes également dans la zone centrale conductrice. En conséquence, il est possible que la conjugaison de plusieurs facteurs tels que la nature limoneuse du recouvrement, ainsi que la proximité de la nappe aquifère, neutralise l'effet susceptible d'être produit par les cavités, ce qui entraîne un faible gradient de résistivités, phénomène accentué par leur faible volume.

Il était alors, vu ces résultats négatifs avec la méthode électrique, indispensable d'entreprendre des mesures avec une autre méthode d'investigation géophysique, à savoir le Géo-radar.

III.2 Utilisation du Géo-radar :

III.2.1 Acquisition des données :

L'appareillage servant à l'acquisition est de marque Ramac-Mala-Geoscience, d'origine suédoise, et comprend (**Fig n°23**)

- Une gamme d'antennes blindées (émettrice et réceptrice dans le même boîtier) de fréquences variant suivant l'antenne utilisée, de 50 , 100, 500 ou 800 Mhz. Celles qui servent fréquemment pour les études de cavités de faible profondeur sont les 500 Mhz et 100 Mhz, qui atteignent des profondeurs maximales, respectivement de 3 à 5m, et de 7 à 10m.
- Un moniteur sert à visualiser les signaux enregistrés instantanément le long de profils dont les distances sont mesurées par une roue étalonnée
- Un chariot (cart) tracte l'ensemble pour l'antenne 500 Mhz ou l'antenne 100 Mhz est tirée par des harnais accrochés à l'opérateur.



Fig n°23 : Appareillages Radar effectuant des mesures avec les antennes 500 Mhz et 100 Mhz.

Sur un site désigné pour détecter d'éventuelles anomalies dans son sous-sol, les données mesurées suivant un balayage de profils longitudinaux et transversaux sont visualisées instantanément grâce au moniteur, sous forme de radargrammes. Ceux-ci indiquent les signaux, réponse à l'émission des ondes électromagnétiques, sur les matériaux de terrain du sous-sol ainsi que les objets anomaux pouvant s'y trouver. En abscisses, les distances parcourues par l'antenne sont marquées, alors qu'en ordonnées figurent les profondeurs.

III.2.2 Traitement des radargrammes :

Un logiciel spécialisé, GroundVision2, permet d'effectuer des opérations sur les radargrammes, afin d'y améliorer le rapport signal/ bruit. Des filtrages sont exécutés pour l'amplification des signaux, élimination des composantes basses fréquences, palette de couleurs pour mettre en valeur les anomalies, etc..(Fig n°24)

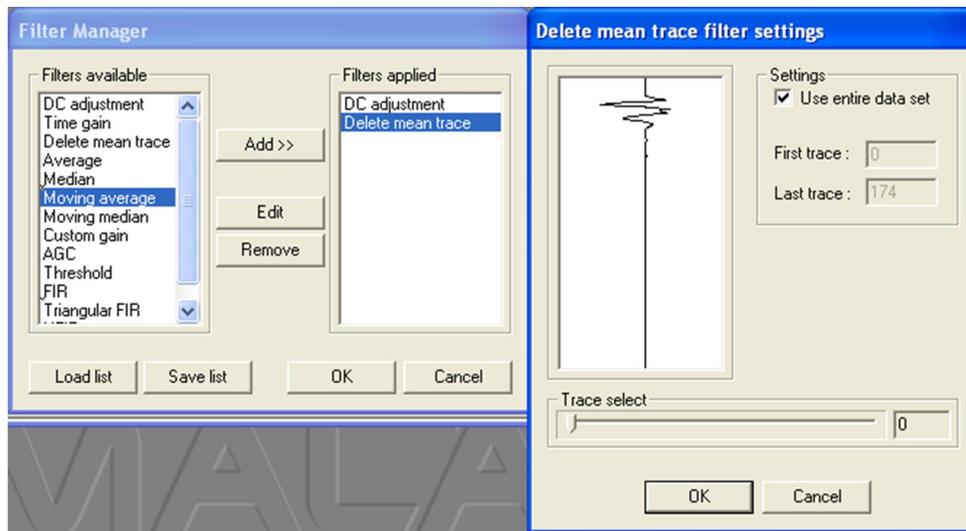


Fig n°24 : Gestionnaire des différents filtres du signal radar

III.2.3 Test sur des canalisations enterrées :

Le radar est utilisé fréquemment pour la cartographie des réseaux enterrés, en particulier dans les sites urbains, du fait de sa grande maniabilité. Des signaux caractéristiques sont mises en évidence de forme hyperbolique régulière, du fait que les cibles (canalisations) sur lesquelles s'effectuent les réflexions des ondes présentent une forme géométrique cylindrique simple. (Fig n°25)

La figure suivante indique une canalisation à la distance de 10.5 m, dont l'axe est perpendiculaire au profil radar. Le sommet de l'hyperbole est à 1m de profondeur, ce qui représente celle de la canalisation.

Le reste du radargramme montre des signaux quasi-horizontaux dûs aux réflexions sur les couches. Une atténuation du signal est constatée en fonction de la profondeur, la fréquence de 500 Mhz utilisée, ne permet pas d'aller au-delà de 3 à 4 m.

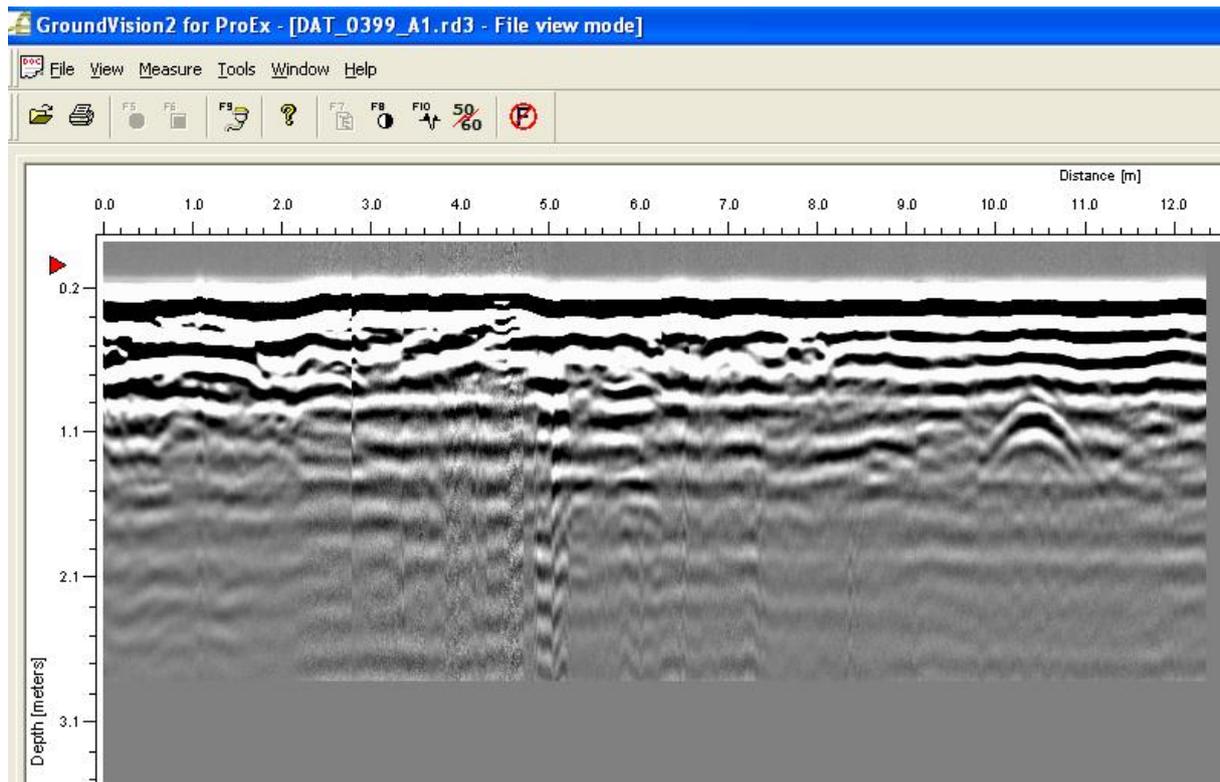


Fig n°25 : Radargramme montrant le passage de l'antenne sur une canalisation (fréquence 500 Mhz)

Un second exemple de radargramme (*Fig n°26*) montre deux canalisations, l'une au dessus de l'autre, aux profondeurs de 1m et 1.7m, la première paraissant de diamètre plus grand. Au dessus, l'on note distinctement le remblayage du terrain sur la tranchée creusée.

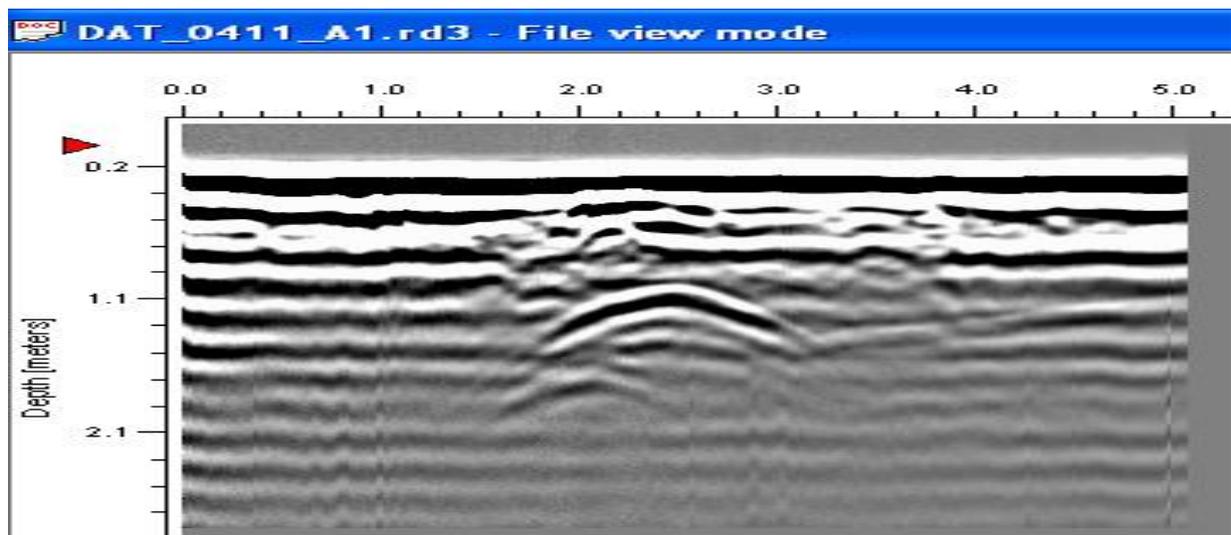


Fig n°26 : Radargramme montrant deux canalisations superposées.

III.3. Détection de cavités sur des sites projetés de constructions dans la région d'Es-Sénia – El Kerma (Oran)

Les radargrammes suivants ont été obtenus avec antenne 500 Mhz, sur des sites projetés à la construction, dans la zone située dans le lotissement juste derrière le concessionnaire Toyota.

Des tranchées avaient été préalablement creusées sur 1m à 1.5 m de profondeur (*Fig n°27*), à l'intérieur desquelles les mesures ont été exécutées avec l'antenne 500 Méga Hertz.



Fig n°27 : Exemple de tranchée dans laquelle les mesures Radar sont effectuées

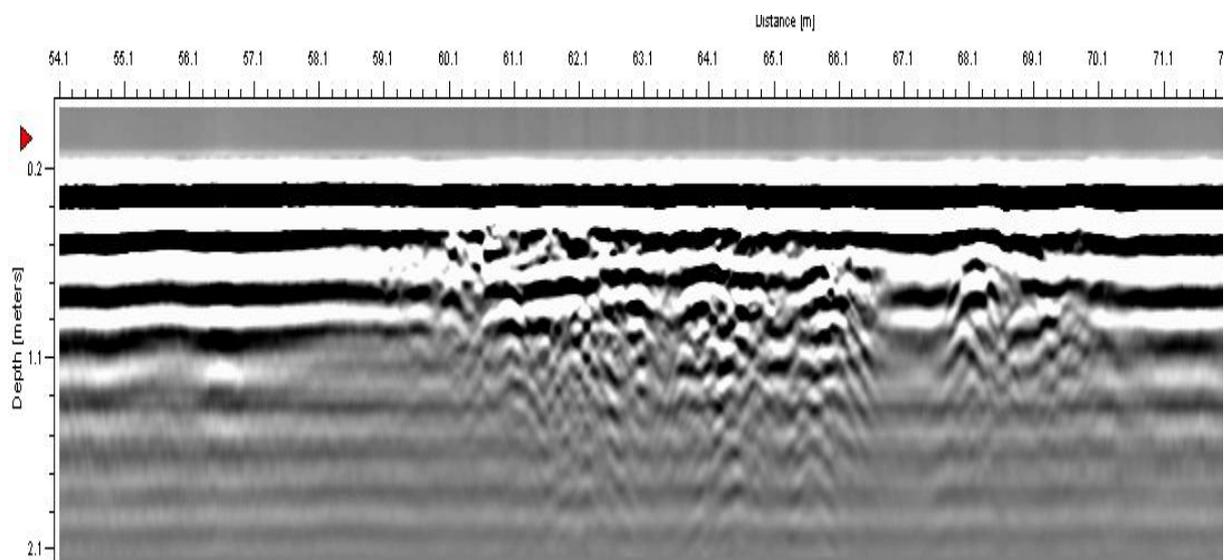


Fig n°28 : Radargramme montrant des signaux anormaux.

On note la présence de fortes diffractions de signaux entre les distances 60m et 66m, de même entre 68m et 70m. La profondeur des signaux perturbés atteint 2m. Des creusements ont été effectués en ces points détectés par le radar, qui ont mis à nu des cavités qui sont de 2 types (**Fig n°28**):

- Cavités en début de formation
- Cavités en phase finale qui se prolongent quelquefois jusqu'à la nappe d'eau, située à environ 4m de profondeur.



Cavité : début du processus de dissolution.

Cavité : processus de dissolution avancé.

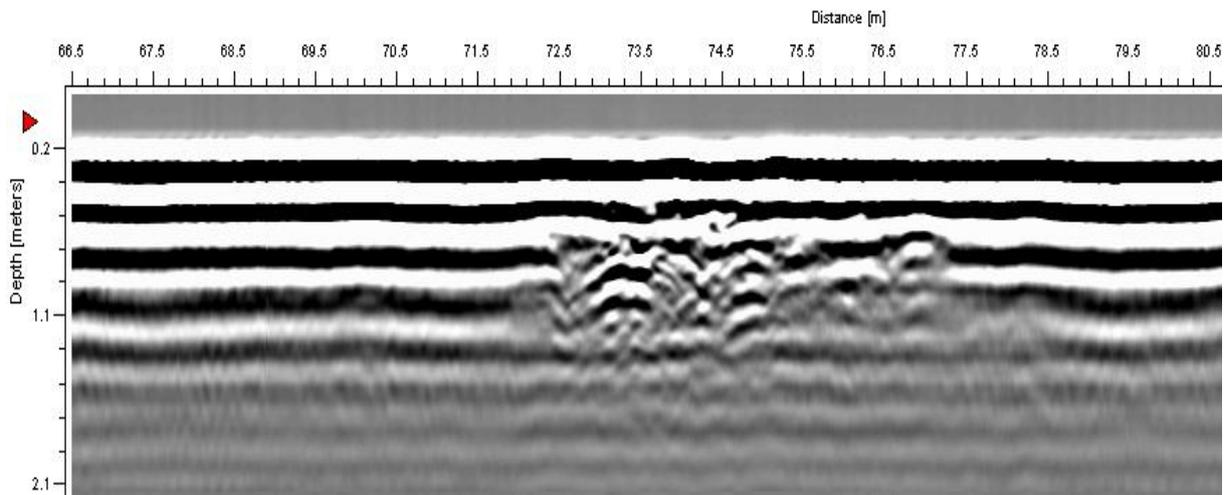
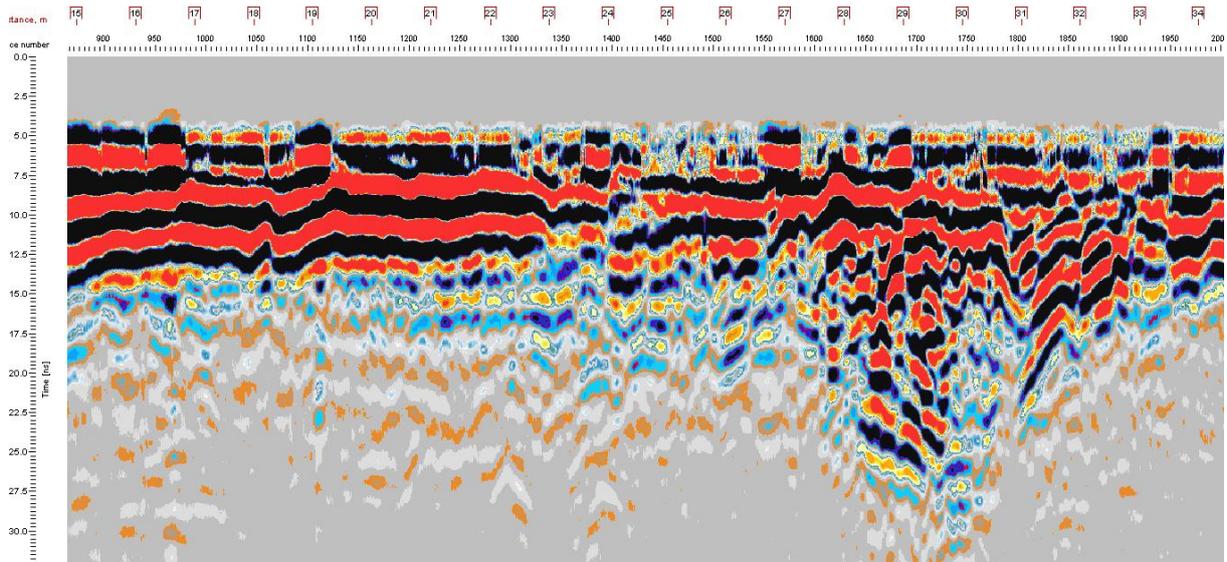


Fig n°29 : Radargramme montrant une importante anomalie.

Sur un site voisin toujours à Sénia, nous observons des signaux anormaux entre 72 m et 75m, dus à une cavité probablement comprise entre 0.5m et 1.5m de profondeur (**Fig n°29**).



Sur un notre site voisin, une importante anomalie sur ce radargramme avec une échelle de couleurs. On voit distinctement à la distance de 30m, la diffraction des signaux, s'enfonçant à la verticale, sur une largeur de 3 à 4m.

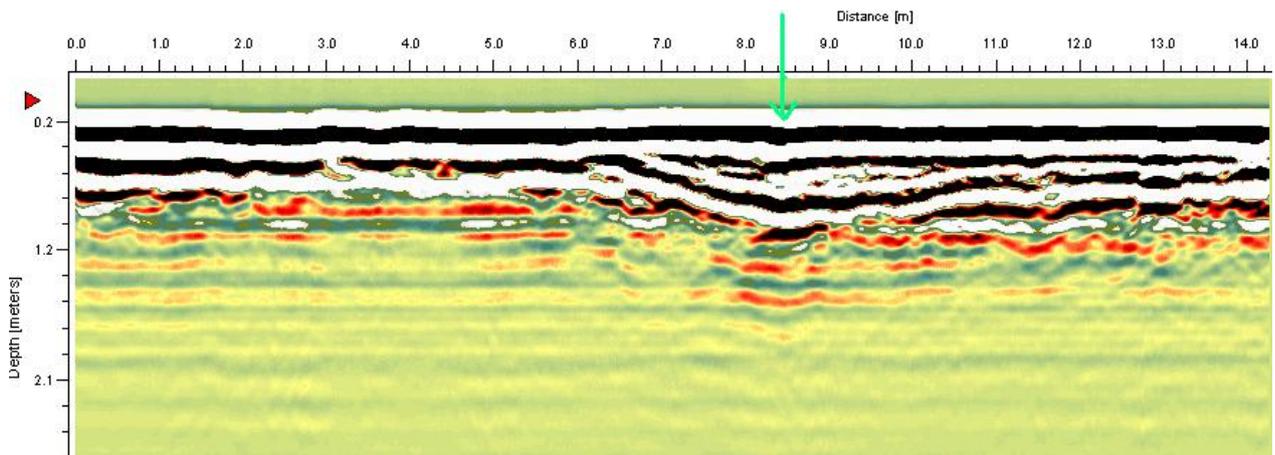


Fig n°30 : Affaissement des couches rendues par les signaux Radar.

La figure précédente montre clairement un affaissement des couches superficielles jusqu'à une profondeur de 1.2 m. Il est possible qu'au dessous il y ait présence d'un vide (*Fig n°30*)

CONCLUSION

Le nombre de sites voués à la construction se développe par le fait d'une demande grandissante. Dans certains cas, ces sites peuvent se révéler à risques car susceptibles de contenir des cavités dans leur sous-sol, ou bien sujets à des glissements de terrain ou autres accidents géologiques tels des failles, etc.... La démarche est alors de sécuriser le projet en amont en diagnostiquant toutes les anomalies pouvant exister sur les sites, ceci afin d'éviter toutes dépenses inutiles. Ainsi, nombre de projets dans des contextes géologiques divers font appel de plus en plus, à ces techniques rapides, moins onéreuses, de diagnostic rapide, constituées par les méthodes de « contrôle non destructif CND » procurées par la géophysique.

A côté des outils classiques représentés par le quadripôle injectant du courant continu dans le sous-sol, et qui peut révéler dans certains cas de faibles contrastes anomaliques, l'utilisation de récentes techniques telles la tomographie qui procure une image « électrique » des couches, ou le géoradar dont la maniabilité se conjugue avec l'instantanéité du résultat, représente une avancée scientifique formidable dans la description des terrains.

Les travaux effectués avec le géoradar dans différents sites de l'agglomération oranaise, en particulier dans le contexte difficile du secteur d'es-Sénia, ont prouvé par leurs résultats la fiabilité de la méthode, autant que le permet le balayage le plus serré par des profils de mesures. Les anomalies révélées cependant sont des signaux physiques qui peuvent seulement correspondre à des points de fragilisation mécanique du matériau. En outre, l'absorption des signaux nécessite d'adapter la fréquence d'antenne afin d'atteindre de plus grandes profondeurs. Il reste que les informations fournies aux ingénieurs leur permettent de prévoir des mesures spécifiques pour les fondations sur les sites décrits comme hautement sensibles.

D'autres conditions géologiques présentes dans la région oranaise, où affleurent un matériel plus résistant à l'instar des calcaires, permettent, ainsi qu'il a été expérimenté, une meilleure pénétration des ondes radar et donc une efficacité plus grande de cet outil géophysique.

Liste des figures :

Fig n°01 : Situation régional de la zone d'étude.

Fig n°02 : Secteur d'étude.

Fig n°03 : Log géologique synthétique la région d'Oran (Hassani M.I, 1987. Extrait).

Fig n°04 : Carte géologique de la feuille d'Oran au 1/50000. (Y. Gourinard, 1957).

Fig n°05 : Log hydrologique de la région d'Oran.

Fig n°06 : Schéma d'un affaissement.

Fig n°07 : Schéma d'un effondrement généralisé de carrière.

Fig n°08 : Schéma d'un fontis par rupture du toit d'une carrière.

Fig n°09 : Fontis sur un Plateau agricole en picardie (Photo BRGM).

Fig n°10 : Le mécanisme d'un fontis dû à la dissolution du gypse.

Fig n°11 : Affaissement d'un parc public.

Fig n°12 : Schéma de dispositif Schlumberger.

Fig n°13 : Schéma de dispositif Wenner.

Fig n°14 : Etape de résolution automatique, et recherche du modèle géo électrique responsable de courbe de sondage électrique (Mahammed, 1992).

Fig n°15 : Carte de pseudo-section.

Fig n°16 : Dispositif de mesure en Tomographie électrique.

Fig n°17 : Etapes du traitement des données de la Tomographie électrique.

Fig n°18 : Schéma de principe de fonctionnement du GPR.

Fig n°19 : Profils de Tomographie électrique montrant les cavités.(El Khammari K, et al, 2007) .

Fig n°20 : Situation de la zone d'étude.

Fig n°21 : Tranchée dans le site montrant son assise représenté par les limons marno-gypseux.

Fig n°22 : La carte de résistivité apparente.

Fig n°23 : Appareillages Radar effectuant des mesures avec les antennes 500 Mhz et 100 Mhz.

Fig n°24 : Gestionnaire des différents filtres du signal radar.

Fig n°25 : Radargramme montrant le passage de l'antenne sur une canalisation (fréquence 500 Mhz).

Fig n°26 : Radargramme montrant deux canalisations superposées.

Fig n°27: Exemple de tranchée dans laquelle les mesures Radar sont effectuées.

Fig n°28 : Radargramme montrant des signaux anormaux.

Fig n°29 : Radargramme montrant une importante anomalie.

Fig n°30: Affaissement des couches par les signaux Radar.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

Al-Farès W. (2002) : Caractérisation des milieux aquifères karstiques et fracturés par différentes méthodes géophysiques, Thèse Doctorat Univ. Montpellier

Davis J.L., Annan A.P. (1989): GPR for high resolution mapping of soil and rock stratigraphy, *Geophysical Prospecting*, 37, 531-551

El Khammari K. et al (2007) : Imagerie combinée géo-électrique-radar des cavités souterraines de Zaouit ech Cheikh (Maroc) *C.R. Géoscience* 339, 460-467

Fenet B.(1975) : recherche sur l'alpinisation de la bordure septentrional du Bouclier Africain à partir de l'étude d'un élément de l'orogénèse Nord maghrébine : Les monts de djebel Tessala et les massifs du littoral Oranaise. Thèse de Doctorat Es Sciences. Université de Nice, The Hague, p, 69-86.

Gourinard Y, (1958) : Recherche sur la géologie du littoral Oranais, Publ. Serv. Carte géol. Algérie, nouv. Sét ... 6, 111 p.

Hassani M. I, (1987) : Hydrogéologie d'un bassin endoréique semi-aride. Le Bassin Versant de la grande SEBKHA D'ORAN (Algérie). Doctorat 3ème cycle. Université de GRENOBLE. 304p.

Loke M.H., Barker R.D. (1996): Rapid least-square inversion of apparent resistivity pseudo-sections by a quasi-Newton method, *Geophysical prospecting*, 44, 131-152

Mahammed D. (1993) : Interprétation automatique des données de la géophysique électrique- application à l'étude de la structure de l'aquifère carbonatée de la région de Tlemcen, 2^{ème} Journées de Géologie Appliquée, Sfax (Tunisie).

Mahammed D., Mansour H., Benzeguir A. (2010) : Utilisation de la géoélectrique et du géo-radar pour la détection de cavités sur des sites de construction de l'agglomération d'Oran *Annales des Mines et de la Géologie*, n° 44 juin 2010, Tunis.

THOMAS G, (1985) : Géodynamique d'un bassin intramontagneux. Le bassin du Bas Chelif(Algérie) durant le Moi- Plio-Quaternaire. Thèse de doct. E-Sci. Université. 54P. 161Fig.

