

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية
République Algérienne Démocratique et Populaire
وزارة التعليم العالي و البحث العلمي
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique
جامعة وهران 2 محمد بن احمد
Université Oran 2 Mohamed Ben Ahmed



Faculté des Sciences de la Terre et de l'Univers
Département des Sciences de la Terre
Mémoire de Master
Option : Risque Naturel et Gestion

Thème :

**Les affaissements en milieux urbains (Cas de la
région d'EL Kerma-Es -Senia)**

Présenté par :

BENTAHROUR FATIHA IMANE

Soutenu le :25 / 07/2019

Devant le jury :

NadjiAbdelmansour :Professeur à l'université d'Oran 2 Président

Mansour Hamidi: Professeur à l'université d'Oran 2 Encadreur

FoukracheMouhamed : Professeur à l'université d'Oran 2 Examineur

Session : 2018 /2019

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ

Résumé

La communauté Urbaine et la ville d'Oran ; connue par des problèmes d'instabilité de terrain ; accentués par une urbanisation anarchique ; bâtie sur des assises d'oueds comblés ; se trouvent confrontées à de nombreuses instabilités de terrain ayant des impacts certains sur l'habitat urbain. Il y a lieu de signaler également un phénomène de dissolution affectant d'une part les calcaires gréseux ; développant une structure karstique et d'autre part des lentilles de calcaires gypseux ; générant de véritables cavités souterraines ; qui sous le poids du bâti existant aura un impact conséquent sur la stabilité de certains immeubles du centre-ville.

Le système aquifère du plateau d'Oran constitue un ensemble hydrogéologique complexe ; caractérisé par un substratum imperméable ondulé et par de fréquents changements latéraux de faciès. Ainsi ; vers le nord la nappe est caractérisée par un système de trop plein le long de la frange maritime alors que vers le Sud c'est le système de drainage qui alimente la nappe alluviale de la Daïait de Morcely .Les écoulements superficiels et les infiltrations peuvent provoquer des risques potentiels d'effondrement ; particulièrement ceux du centre-ville d'Oran. Il est fondamentalement important de signaler qu'une bonne partie des constructions sont érigées sur une formation de remblai. Ces remblais étant instables dans le temps ; vont provoquer au sein des constructions une fissuration importante des murs et des affaissements du sol ; résultant le plus souvent de l'imbibition de ce remblai (très perméable) par les venues d'eau d'infiltration ; suralimentées continuellement par un réseau d'assainissement souvent défectueux.

Mots clés: affaissement ; effondrement ; instabilité de terrain ; structure Karstique

Remerciements

J'adresse mes vifs remerciements à mon encadreur **Pr Mansour Hamidi** pour ses conseils et la grande disponibilité tout au long de cette phase de formation ainsi que **Mr Mhammad Djilali** pour le temps et l'aide qu'il a consacré à mon travail.

Je remercie messieurs **Foukrache.M&Naji**.Ad'avoir accepté de prendre part dans ce jury.

Je tiens également à remercier tous les enseignants qui ont contribué de loin ou de près à notre formation.

DÉDICACE

Je dédie ce modeste travail en signe de respect et de Reconnaissance à mes très chers parents, en particulier ma très Chère mère, pour ses Sacrifices tout au long de ma vie ; mes frères; mes Sœurs; toute ma grande famille, en particulier mes tantes, et mes tontons ; tous mes amis sans exception ; et à tous ceux que j'aime, et ceux qui pensent à moi.

Bentahrour Imene Fatiha.

SOMMAIRE

Résumé	I
Remerciement.....	II
Dédicace	IV
Liste des figures.....	V
Liste des tableaux.....	VI
Introduction générale	02

PREMIER CHAPITRE

CONSIDERATIONS GENERALES ET CONTEXTE HYDROGEOLOGIQUE

I. CONSIDERATIONS GENERALES DU DOMAINE D'ETUDE

1. Introduction.....	2
2.Situation géographique générale.....	3
2.1. Situation géographique locale	4
2.2.Géomorphologie de la région d'étude.....	4
3. Aperçu climatologique.....	5
4. La pluviométrie.....	5
4-1-Température.....	6
4-2- Régime thermique.....	6
4-3-1 Courbe pluviométrique.....	6

4-3-2 Courbe ombrothermique.....	7
----------------------------------	---

II.CONTEXTE HYDROGEOLOGIQUE

1. La géologie du secteur.....	8
2. Hydrogéologie du site.....	9
3. Descriptions des principaux aquifères.....	10
3-1- <i>Nappe des alluvions rouges a galets</i>	10
3-2- Nappe du plateau d’Oran.....	10
3-3- Nappe semi captive.....	10
4. Piézométrie du secteur d’étude.....	11
4.1 Interprétation de la carte piézométrique.....	12

DEUXIEME CHAPITRE

RISQUES GEOLOGIQUE ETDESCRIPTION DES CAVITES ; PROCESSUS DEFORMATION ET RISQUES ENGENDRES

I. Risques géologiques.....	14
II. Introduction aux risques géologiques.....	14.
III. Les risques liés aux affaissements.....	15
1. Notion de risque et aléa.....	15
2. Plan général d’aménagement ; vulnérabilité ; plan de zonage réglementaire.....	16
IV. Les types de cavités souterraines.....	17
V. Les risques liés aux cavités souterraines.....	18
1. Les affaissements.....	19
2. L’effondrements.....	20

2.1 Les facteurs de risque d'effondrements.....	22
3. Les fontis.....	22
4. Suffosion.....	23
VI. Exemple : durée de formation des cavités souterraines dans les régions calcaires	24
VII. Processus liés a la dissolution du gypse.....	25
1. Le gypse : un matériau de risque.....	27
2. Les risques liés au gypse.....	29

TROISIEME CHAPITRE

APPORT DU GEORADAR A LA RESOLUTION AUX PROBLEMES DES RISQUES URBAINS

I. Introduction	40
II. Fonctionnement du GPR (Groundpenetrating Radar).....	40
III.Exemple pratique de détection des cavités par la méthode d'imagerie électrique.....	42
IV. Exemple pratique de détection des cavités dans des sites de la région d'Es-Sénia_Oran (MahammedD , et al. 2010).....	43
1. Par la méthode électrique.....	43
V. Contexte géologique.....	43
VI. Problèmes posé après l'emploi de la géophysique électrique..	45
1. Utilisation du géo-radar.....	45
2. Acquisition des données.....	46

3. Traitement des radargrammes.....	47
4 . Test sur des canalisations enterées.....	47
5. Détection de cavités sur des sites projetés de constructions dans la région d’Es-Senia-El Kerma (Oran).....	49

QUATRIEME CHAPITRE

TRAITEMENT ET MOYENS DE REMEDIATION

I. Principes et objectifs.....	58
II. Méthodes de comblement des cavités.....	58
1. Remblaiement partiel.....	59
2. Remblaiement direct a partir du fond par engins mécanisés.....	60
3. Piliers maçonnés.....	60
4. Pieux réalisés par forage ou battage.....	61
5. Traitement des terrains par injections.....	62
6. Suppression des vides par comblement – terrassemen.....	63
7. Remplissage par mousses thermodurcissables.....	66
III. Conclusion.....	68

LISTE DES FIGURES

Fig. 1 Vue satellitaire de la zone d'étude (Google Earth ; 2019).....	3
Fig. 2 Carte géographique –Es-Senia(Googlemap ; 2013).....	4
Fig. 3 La morphologie du terrain en 3 D.....	4
Fig. 4 Température en 2016 (Oran / Es-Senia).....	5
Fig. 5 Précipitations en 2016 (Oran / Es- Senia).....	6
Fig. 6 Courbe ombrothermique 2016 (Oran – Es-Senia).....	6
Fig. 7 Ecoulement de surface.....	7
Fig. 8 La géologie du secteur d'étude (SOGREAH ; 1984).....	8
Fig. 9 Localisation des puits.....	9
Fig.10 Carte piézométrique de la zone d'étude	11
Fig. 11 Plan de situation de canal de protection.....	12
Fig. 12 Evaluation du risque.....	15.
Fig. 13 Plan de zonage réglementaire.....	16
Fig. 14 Karst	17
Fig. 15 Grotte.....	17
Fig. 16 Gouffre.....	18
Fig. 17 Effondrement d'une zone sous-cavée par suffosion BRGM...	18
Fig. 18 Exemples d'affaissements et glissements a Oran centre.....	18

Fig. 19 Illustration schématique d'un affaissement BRGM.....	19
Fig. 20 Illustration schématique d'effondrement dans un relief karstique.....	20
Fig. 21 Illustration schématique d'un fontis BRGM.....	21
Fig. 22 Processus de dissolution des formations carbonatés et gypseuses.....	23
Fig. 23 Cristal de gypse.....	23
Fig. 24 Gypse « saccharoïde »	24
Fig. 25 Gypse fer de lance	24
Fig. 26 Mécanisme de formation de gypse en milieu marin lagunaire.....	25
Fig. 27 Cavité karstique suite a la dissolution du gypse a El Kerma...26	
Fig. 28 Le mécanisme d'un fontis du a la dissolution d gypse.....	27
Fig. 29 Extrait de la carte géologique de la région d'Oran au 1/50.000,Gourinard 1992.....	28
Fig. 30 Carte de zonage sismique du territoire national (d'aprèsCGC).....	30
Fig. 31 Illustration schématique d'un essai préssiométrique.....	34
Fig. 32 La zone d'étude ou les différents sondages ont été.....	37.
Fig. 33 Schéma de principe de fonctionnement du GRR.....	40

Fig. 34 Profils de tomographie électrique montrant les cavités (El Khemmari K et al , 2007).....	42
Fig. 35 Tranchée dans le site montrant son assise représentée par les limons ..marno-gypseux.....	43
Fig.36 La carte de résistivité apparente.....	44
Fig. 37 L'appareillage pour l'étude des cavités.....	45
Fig. 38 Gestionnaire des différents filtres du signal radar.....	46
Fig. 39 Radar gramme montrant le passage de l'antenne sur une canalisation (fréquence de 500 Mhz).....	47
Fig. 40 Radar gramme montrant deux canalisation superposées...	48
Fig. 41 Exemple de tranchée dans la quelle les mesures Radar sont effectuées.....	49
Fig. 42 Radar gramme montrant des signaux anomiques.....	49
Fig. 43 Cavité début de processus de dissolution.....	49
Fig. 44 Processus de dissolution avancé.....	50
Fig. 45 Radar gramme montrant une importante anomalie.....	50
Fig. 46 Des signaux anomaliques entre 72 m – 75 m.....	51
Fig. 47 Affaissement des couches rendus par les signaux radar.....	51
Fig. 48 Radar gramme original visualisé par le logiciel.....	52
Fig. 49 Le meme radar gramme avec application d'une palette de couleurs pour mieux mettre en valeur les signaux parmi les quels certains peuvent représenté des anomalies.....	53

Fig. 50	Liste des différents filtres susceptibles d'être appliqués	53
Fig. 51	Le meme radar gramme après application de certains filtres...	53
Fig. 52	Transformation des temps a réflexion en profondeur.....	54
Fig. 53	Radar gramme avec les profondeurs de l'anomalie obtenues par application de la vitesse des ondes EM.....	54
Fig. 54	Profil représentant une importante anomalie au centre du radargramme.....	55
Fig. 55	Hyperbole adroite du radargramme caractéristique d'une canalisation enterrées.....	58
Fig. 56	Remblaiement partiel par déversement gravitaire.....	58
Fig. 57	Remblaiement direct par le fond avec des engins mécaniques.....	59
Fig. 58	Consolidation par pilier maçonnés sous un bâtiment neuf.....	60
Fig. 59	Pieux dans gypses (A) et les calcaires (B).....	61
Fig. 60	Injection de mortier ou de coulis sous faible préssion.....	62
Fig. 61	Suppréssion des vides par la méthode terrassement – comblement.....	64
Fig. 62 a	Remplissage d'un fontis par de la mousse thermo -dure	65
Fig. 62 b	Mise en place d'une couverture végétale (Conflanste-Honorine , Val-d'Oise).....	

Liste des tableaux

Tableau 1 :Sondage SP1.....36

Tableau 2 :Paramètres physiques pour certains matériaux
géologiques.....41

**LES AFFAISSEMENTS EN MILIEU
URBAIN CAS DE LA REGION D'EL
KERMA Es_Senia (ORAN)**

I. CONSIDERATION GENERALES DU DOMAINE D'ETUDE

1. Introduction

Les risques géologiques en zone urbaine constituent pour les collectivités locales de la ville d'Oran une préoccupation majeure. C'est dans ce cadre que l'étude entamée a permis de comprendre les phénomènes liés à la déformation du sol ; du bâti et des infrastructures de base. L'investigation hydrogéologique en zone urbaine s'est avérée très délicate en raison des difficultés d'accès aux informations hydrodynamiques et du champ d'observation très réduit des affleurements géologiques. C'est ainsi que la mise en place de ces informations géologiques ; hydrogéologiques et géomorphologiques couplées aux données urbaines a permis de faire ressortir une analyse spatiale pour l'aménagement ; la gestion du risque géologique et la prise de décision.

2. Situation géographique générale

Les terrains néogènes sublittoraux de l'Algérie occidentale s'allongent parallèlement à la côte méditerranéenne, depuis la frontière Algéro-Marocaine à l'ouest jusqu'aux environs d'Alger. Ils forment des zones peut-être élevées par rapport aux chaînes secondaires plissées qui les encadrent. La région d'Oran fait partie des chaînes littorales de l'atlas tellien, elle se situe au Nord-Ouest de l'Algérie (figure 1) et elle s'étend de djebel Murdjadjo à l'ouest jusqu'à Arzew à l'est.



Fig. 1 : Vue satellitaire de la zone d'étude (image Google Earth ; 2019)

3. Situation géographique local :

La ville d'ES SENIA chef-lieu de Daïra relève administrativement de la wilaya d'Oran, elle est située sur l'axe de la route nationale RN 2A reliant ORAN–l'aéroport. De part la position géographique faisant l'intersection de plusieurs axes de communications (figure 2). Elle est comprise dans une bande rectangulaire de 2700 m de longueur sur 2400 m de largeur aux coordonnées U.T.M (fuseau 30).

Le secteur d'étude fait 32.41 Km² avec un périmètre de 29.79 Km :

$$X1 = 712\,917.50 \qquad X2 = 718\,827.89$$

$$Y1 = 394\,316.77 \qquad Y2 = 394\,802.29$$

L'aire de l'étude est limitée :

Au Nord : Sidi Chahmi

A l'Est : EL Braya

Côté Ouest : la grande Sebkhha et au Sud : Tafraoui



Fig. 2 : Carte géographique - Es Senia – Google-Map ; 2013

4. Géomorphologie de la région d'étude :

Les reliefs situés immédiatement à l'Ouest d'Oran culminent à plus de 400 m et comportent des pentes raides qui plongent au Nord vers la mer et à l'Est et au Sud-est vers l'agglomération Oranaise où se trouve également la ville d'Es-Sénia. Les ravins qui strient le versant Sud-est peuvent occasionnellement collecter des eaux ruisselées qui transitent par la ville d'Oran vers sa banlieue Sud. La dépression intérieure située au Sud de la bande côtière, comprend la majeure partie de la cuvette d'Es-Sénia . L'altitude du sol diminue quand on se rapproche des deux axes de dépressions (sebkhha d'Oran et Daïa Morsli). Cependant la surface topographique est assez complexe en raison de nombreux accident locaux tels que les buttes d'accumulation

éolienne, collines et vallées correspondant à des micro-plissements, ou cuvettes fermées qui résultent probablement de phénomènes de dissolution (figure 3).

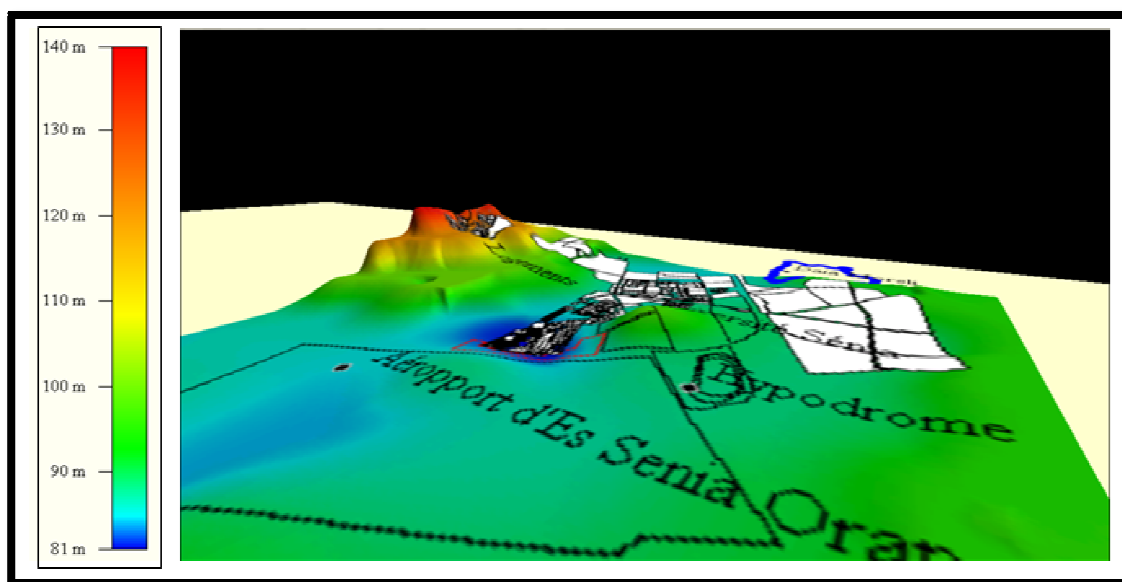


Fig. 3 : La Morphologie du terrain en 3D (Echelle verticale exagérée 15 fois)

5. Aperçu climatologique

Le climat de la région a une influence directe sur le niveau piézométrique et par conséquent sur la direction de l'écoulement souterrain qui est un facteur déclencheur des glissements et des affaissements. D'une manière générale ; la région oranaise jouit de ce qu'il est convenu de dénommer le climat méditerranéen. Cette appellation ne constitue cependant qu'une première approche en raison de l'existence de multiples microclimats locaux régis aussi bien par des conditions atmosphériques que topographiques ou géographiques. La présence de cuvettes endoréiques ; dolines ; dayas ; sebkha dans la région d'Oran ne fait que confirmer le caractère aride de la région.

5-1. La pluviométrie

La wilaya d'Oran se situe en grande partie dans le domaine climatique méditerranéen semi-aride, elle reçoit en moyenne entre 300 à 400 mm de précipitations annuelles. L'eau y est donc rare, irrégulière et inégalement répartie dans l'espace. Les facteurs

limitatifs sont d'ordres climatique, morphologique, lithologique, structural et géomorphologique . (Bellal ,2012)

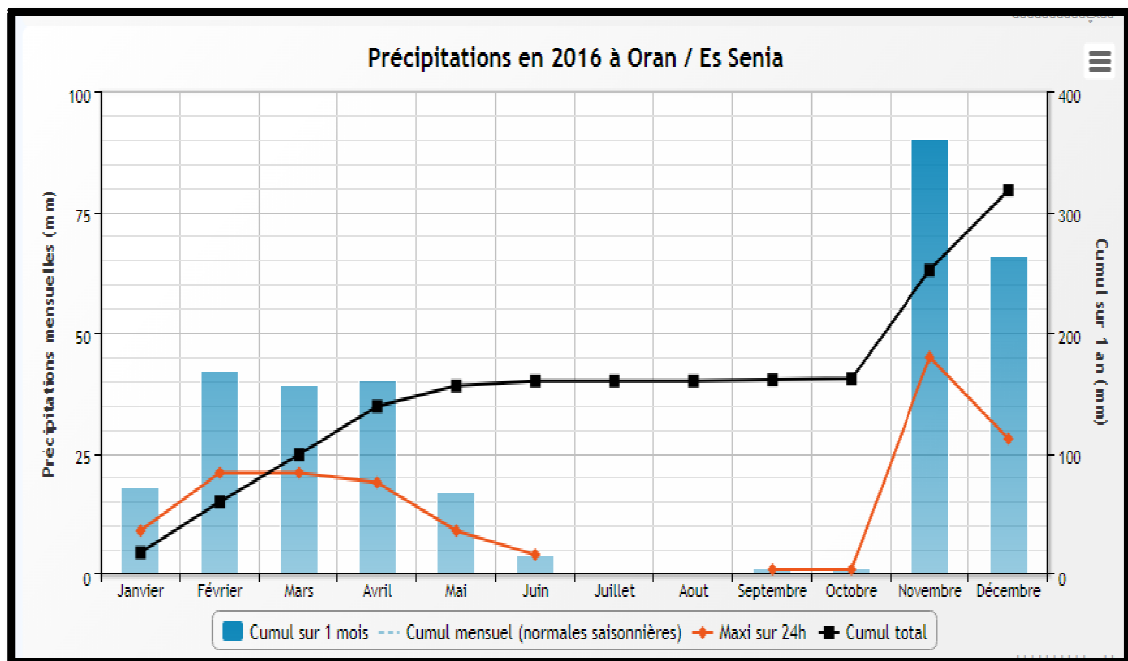


Fig. 4 : Précipitation en 2016 (Oran – Es-Senia)

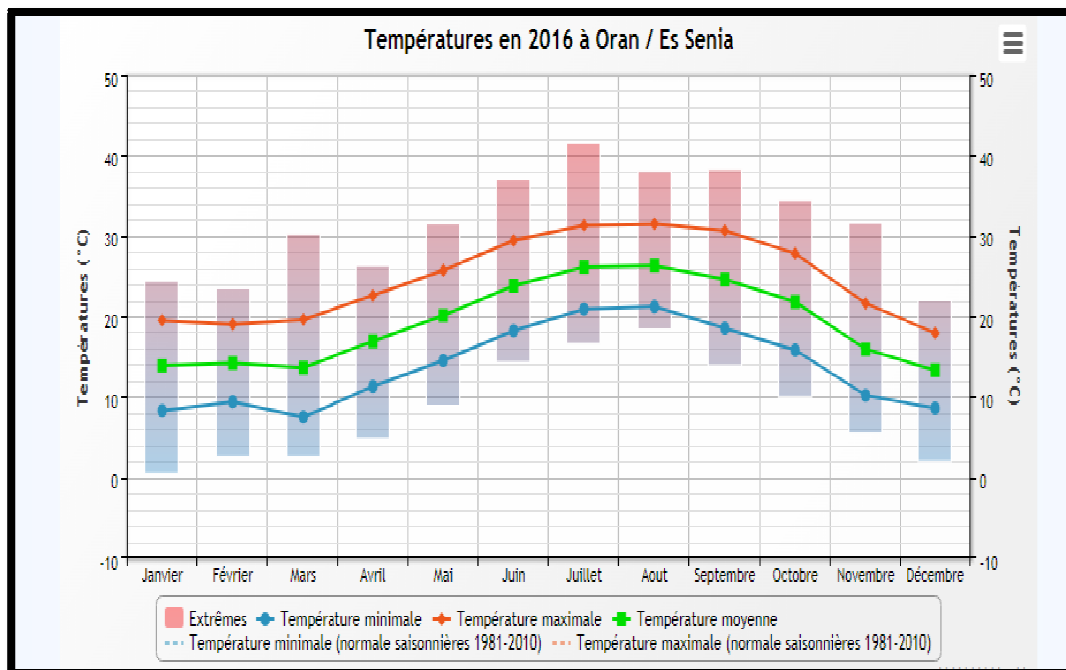


Fig. 5 : Température en 2016 (Oran- Es -Senia)

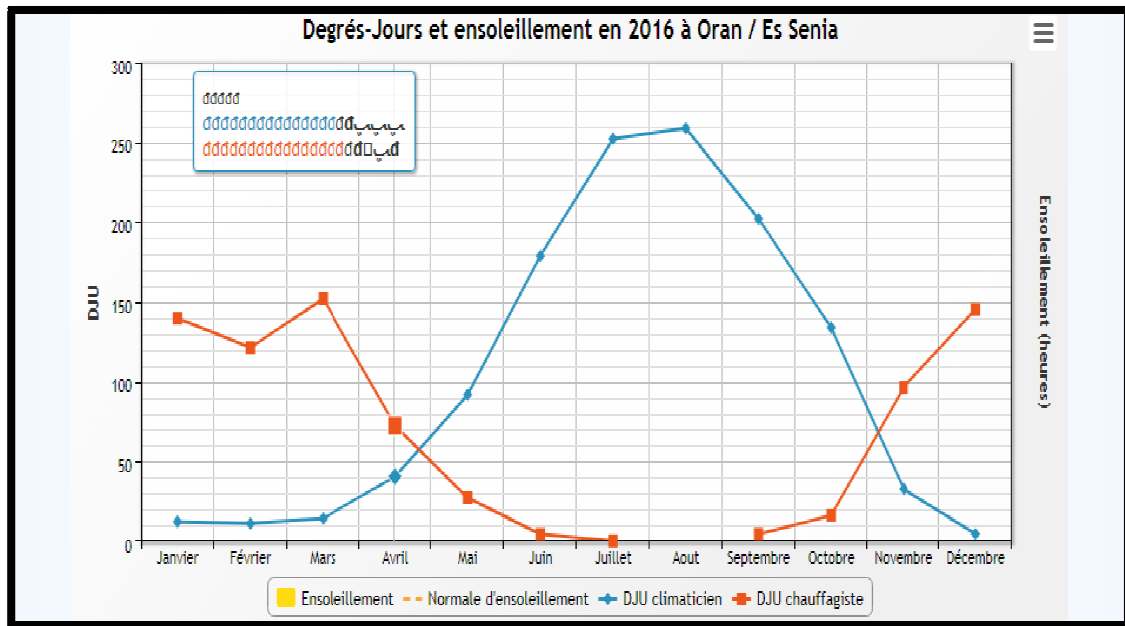


Fig. 6 : –Courbe ombrothermique en 2016 (Oran – Es-Senia)

II. CONTEXTE HYDROGEOLOGIQUE :

1. Aperçu Hydrographique :

La plaine de Sénia s'étend entre la Daïa de Morsli et la grande Sebkha d'Oran à une altitude le plus souvent compris dans la zone concernée, entre 81 m et 92 m d'altitude NGA. Elle présente de nombreuses dépressions secondaires. A l'Est de la Daïa de Morsli, la plaine s'élève légèrement pour se raccorder aux faibles pentes du secteur d'El-Emir Abdelkader. Les chenaux naturels d'écoulement n'ont pu se créer que dans la zone de coteaux où la pente est suffisamment forte. A l'arrivée dans la plaine d'es-Sénia, leurs cours déjà peu marqués deviennent pratiquement inexistantes (figure 15).

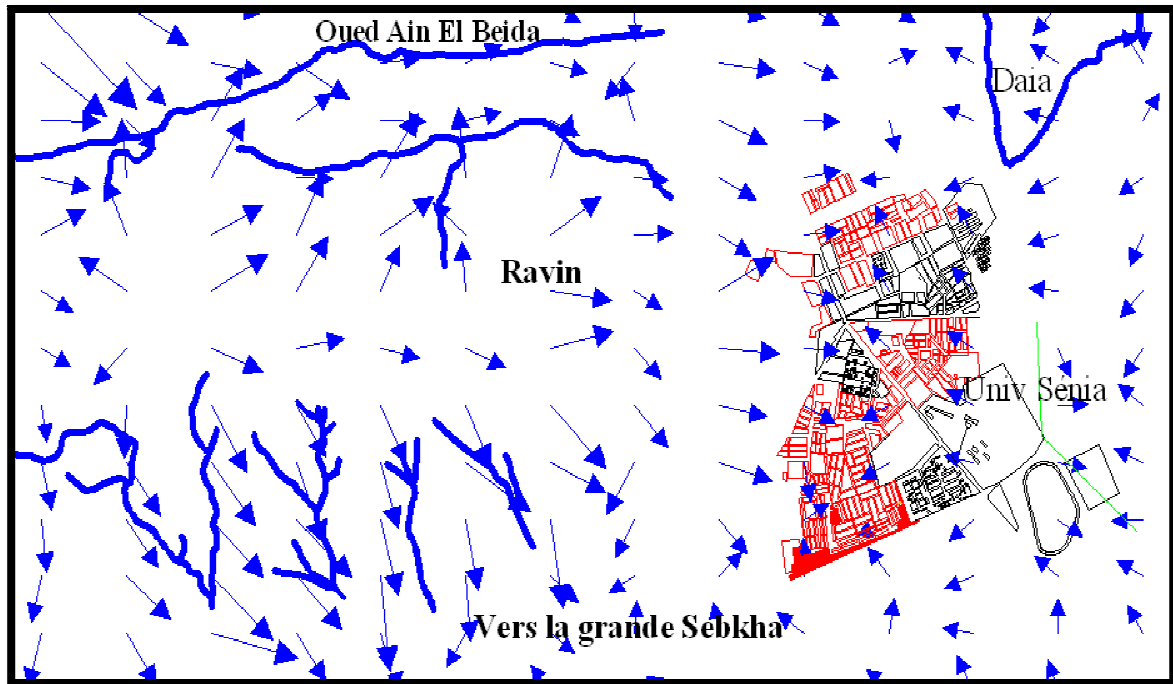


Fig. 7 : Ecoulement de surface

2. La géologie du Secteur d'étude :

La zone d'étude se caractérise par des formations alluviales du Quaternaire continentale (Voir figure. 8), la ville se trouve sur une ancienne dépendance de la Sebka où celle-ci a déposé une couche de gypse en paillettes surmontée par une couche calcaire jaune argileuse. Au-dessous de la terre végétale, la carapace calcaire souvent gypseuse avec un important réseau de dissolution lui donnant un aspect karstique. Elle est donc localement très perméable. Cette couche calcaire s'amincit vers la direction de l'aéroport où la couche supérieure de calcaire n'existe pratiquement plus et le sol est constitué par le gypse lui-même (SOGREAH, 1984).

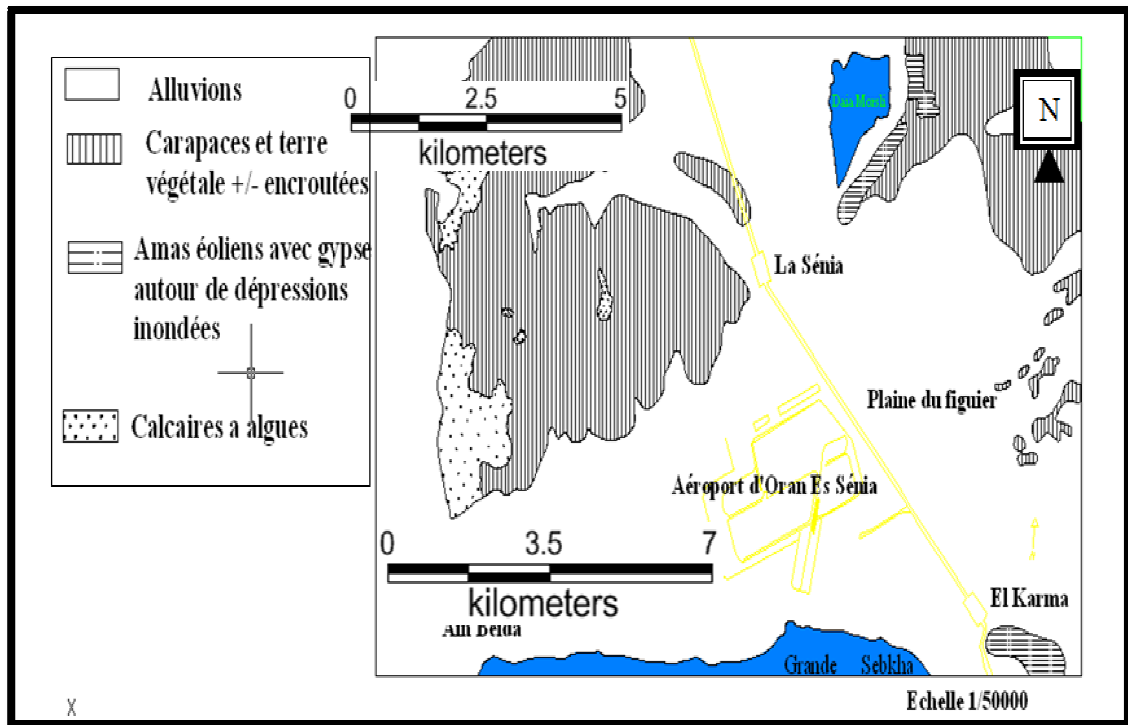


Fig. 8 : la géologie de la zone d'étude (SOGREAH, 1984).

3. Hydrogéologie du site

L'étude géologique permet d'individualiser plusieurs aquifères superposés. Le forage exécuté au niveau de l'ancienne Huilerie Stella différencie 3 nappes (BETEC, 2000) :

De 2 à 11.20 m : **une nappe superficielle, saumâtre** ;

De 24 à 49 m : **une première nappe profonde** ;

De 59 à 93m : **une seconde nappe profonde.**

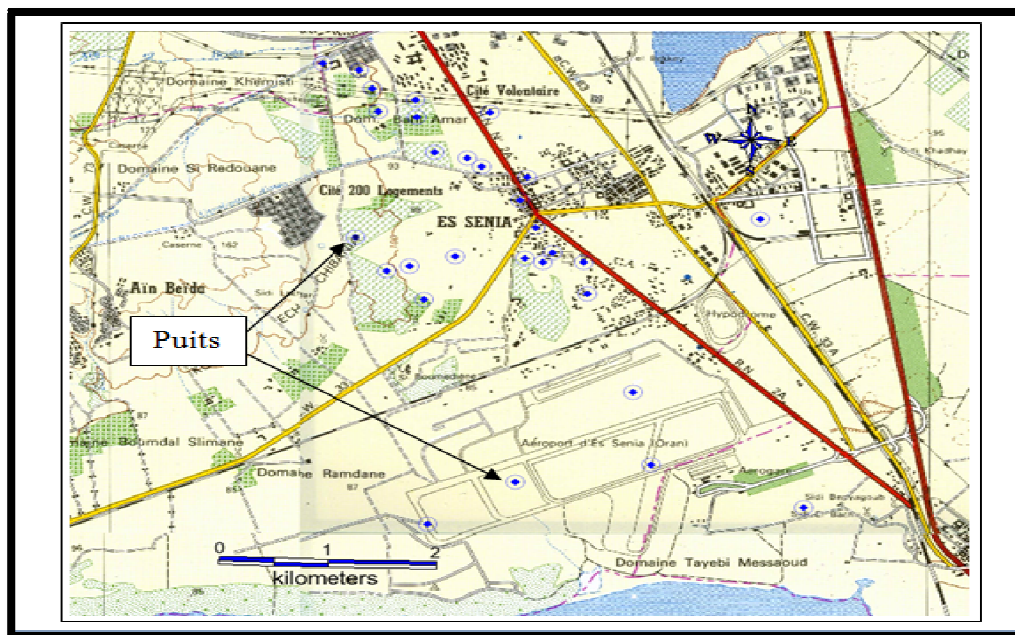


Fig. 9 : Localisation des puits

Nappe des alluvions rouges à galets :

Cette nappe est très étendue dans la zone. Elle est très exploitée par puits. Son niveau est à très faible profondeur. Ces eaux sont de mauvaise qualité suite à un enrichissement en sels à cause de l'évaporation. Les eaux de cette nappe ont d'importantes teneurs en chlore, sodium et sulfates, avec des résidus secs dépassant parfois les 26g/l. Les eaux de cette nappe ont un pouvoir corrosif très élevé du fait de l'abondance des ions Cl et SO₄. Entre la crue et l'étiage on note une augmentation du résidu sec par apports aux sulfates et chlorures. Les nitrates sont exceptionnellement supérieurs à 100mg/l.

Nappe du plateau d'Oran :

Cette nappe a été reconnue dans la région du Petit lac et de la Daïa Morseli. Elle est d'extension homogène, entre Oran et Es-Sénia. Sa mauvaise qualité chimique est due en outre à l'apport en sels par évaporation, aux pollutions industrielles et domestiques.

Nappe semi-captive :

Développée uniquement dans la cuvette d'Es-Sénia, cette nappe est constituée de calcaire, parfois crayeux du pliocène supérieur. Son substratum est formé de marnes

du Miocène. Son alimentation se fait directement par les affleurements assez étendus dans le plateau d'Oran (BETEC, 2001).

Plusieurs sondages et puits ont été exécutés ou creusés dans la zone d'étude (figure 16) est qui vont nous aidé à bien déterminé la profondeur et le niveau piézométriques de la nappe superficielle.

4. Piézométrie du secteur d'étude

Les données sur le niveau statique sont celle mesuré à partir des puits par L'ANRH 2011 (figure 9), la (figure 10) montre la direction des écoulements souterrains.

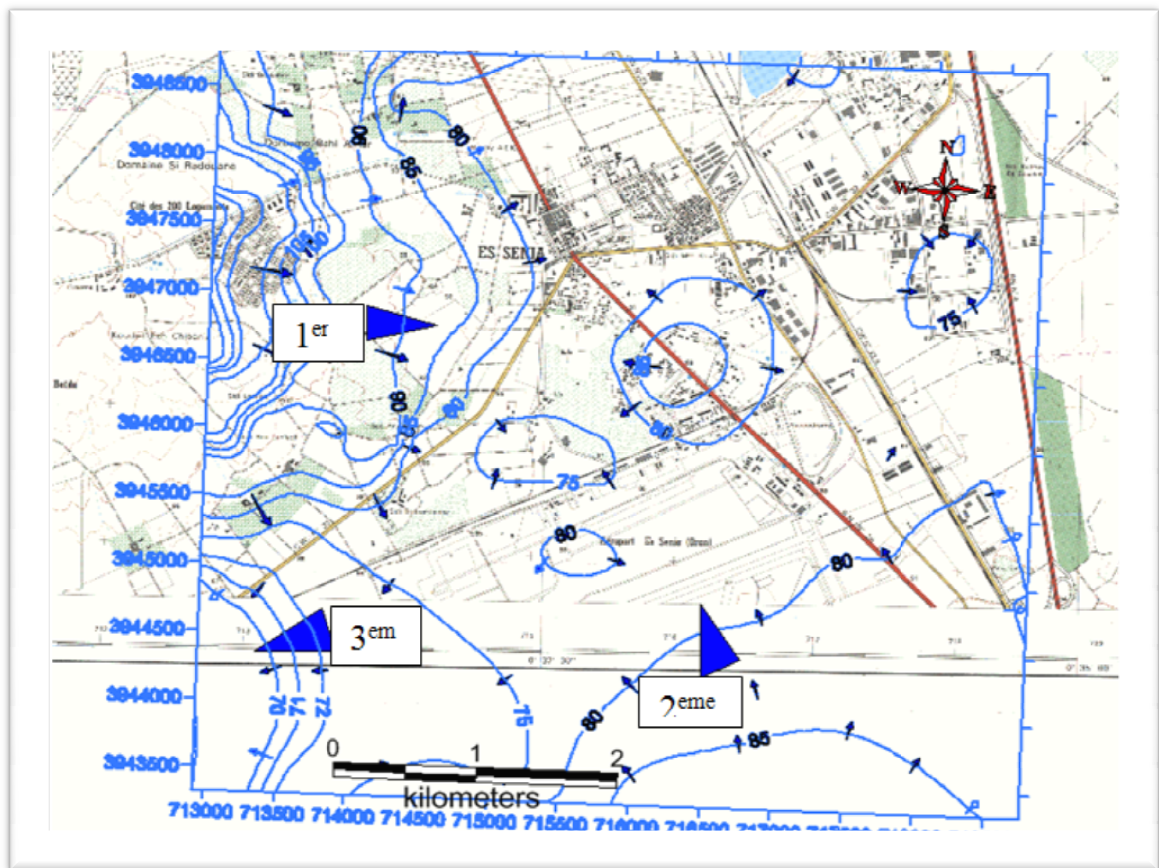


Fig. 10 Carte piézométrique de la zone d'étude (2011)

4.1. Interprétation de la carte piézométrique :

L'étude de la carte piézométrique de la région de Sénia permet de distinguer trois sens d'écoulement principaux – Le premier de l'ouest vers le centre de la zone d'étude, le deuxième du Sud-est vers la même zone, se qui va donner probablement un trop plein non négligeable à la nappe et enfin, un troisième sens vers le Sud-ouest où une partie des eaux souterraines alimente la grande sebkha d'Oran. Notons aussi que le gradient hydraulique est très faible au niveau du centre du secteur d'étude. D'après la carte (figure11), la ville d'Es Sénia se situe exactement où les eaux souterraines convergent, se qui augmenterait considérablement et certainement le risque des remontées des eaux dans la région.

Actuellement La ville est protégée dans ca partie Nord par un canal à ciel ouvert contre les eaux pluviales. Ces eaux venant depuis le versant Sud-est du Djebel Murdjadjou et, donnent naissance à l'oued Chaban et Oued Mettioua. Les eaux de ces deux Oueds sont drainées par l'oued Ain Beida, puis rejetées directement dans le canal qui longe la nouvelle rocade du 4^{ème} périphérique fig11

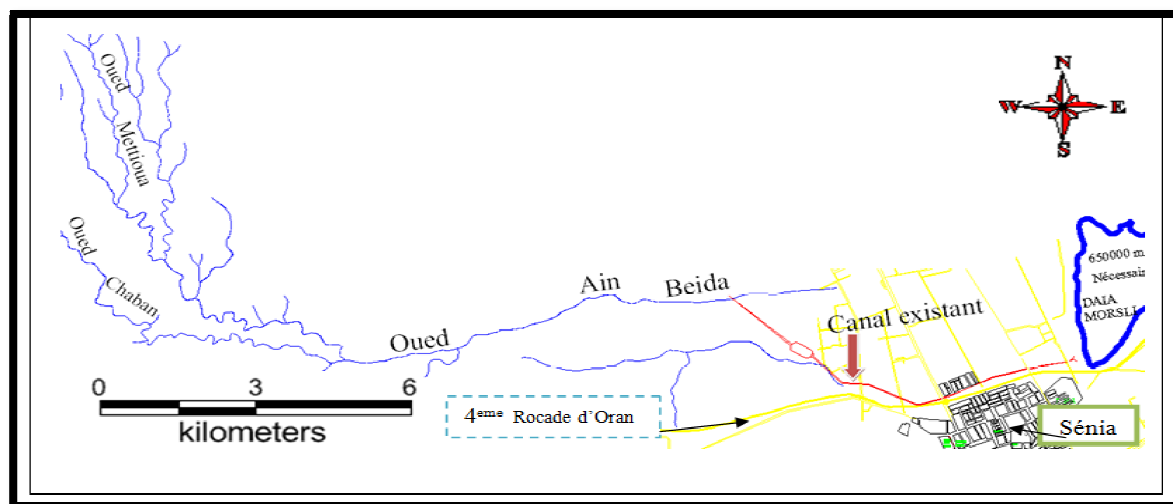


Fig. 11 : plan de situation de canal de protection

**RISQUES GEOLOGIQUES ET
DESCRIPTION DES CAVITES ,
PROCESSUS DE FORMATION ET
RISQUES ENGENDRES**

II. Les risques géologiques

2.1 Introduction au risque géologique de la région :

La région d'Oran ; de par sa complexité morpho-structurale et son activité sismo-tectonique ; présente des risques géologiques liés a la nature de ses terrains qui menacent l'instabilité de site urbains.

Classée parmi les zones littorales les plus exposées ; la région d'Oran est caractérisée par l'existence d'un réseau de faille qui ; lors de leur rejet vont engendrer des glissements ; des affaissements et des éboulements au niveau des falaises (falaise de canastel) et des zones de piedmonts (faille de la calère d'Oran ; tunnel près de la pêcheurie)

D'autres phénomènes particuliers ; liés étroitement a l'hydrogéologie urbaine (écoulements de surface et souterrains) ; s'ajoutent aux risques géologiques ; notamment les phénomènes de dissolution de certaines formations géologiques par les eaux d'infiltration.

2.2 Notion générale sur les Risques :

La définition usuelle donnée pour le risque est la suivante :

$$(\mathbf{Risque}) = (\mathbf{aléa}) \times (\mathbf{enjeu}) * (\mathbf{Vulnérabilité})$$

Un risque majeur se définit comme la survenue soudaine, parfois imprévisible, d'une agression d'origine naturelle ou technologique dont les conséquences peuvent entraîner de graves dommages sur l'homme, les biens et l'environnement.

Pour qu'il existe un risque, il faut les 2 critères suivants :

- un aléa (phénomène naturel ou accident technologique) qui a une faible probabilité d'avoir lieu
- une vulnérabilité importante (vies humaines, bien matériel, enjeux environnementaux) .

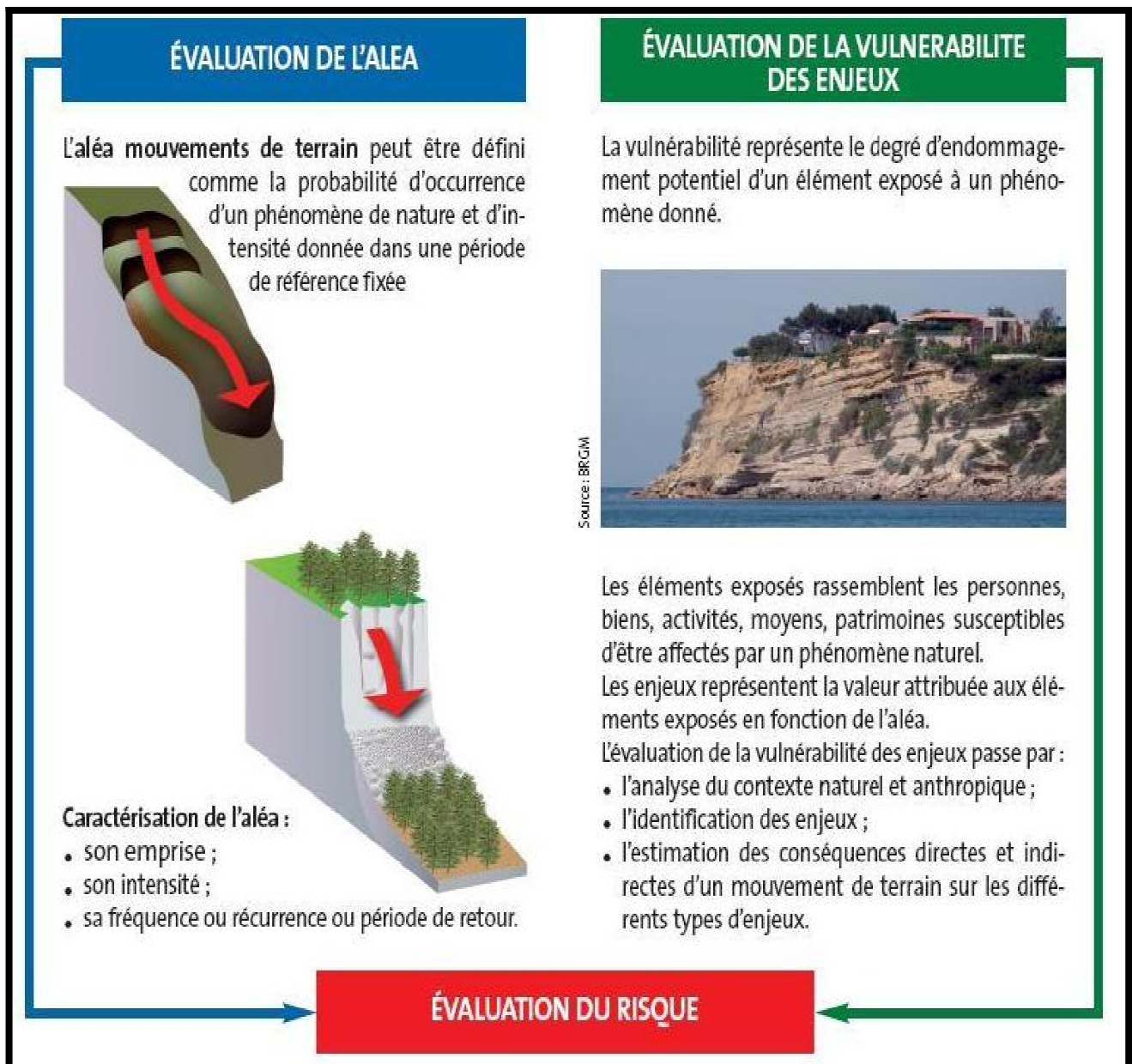


Fig. 12 : Evaluation du risque

2.2.1 Plan général d'aménagement, Vulnérabilité et plan de zonage réglementaire

2.2.2 Plan général d'aménagement

Il est obtenu en regroupant les zones élémentaires du plan général d'aménagement (PGA) en quelques classes d'enjeux : zone urbaine, zone d'extension urbaine, zone d'habitat dispersé, zone industrielle d'activité et d'équipement, zone agricole, zone naturelle à protéger. Dans l'hypothèse où le PGA ne serait pas disponible, une carte

de même nature mais plus sommaire et moins précise serait établie à partir des données cartographiques et de celles relevées sur le terrain. Les enjeux ponctuels (poste de secours, les hôpitaux...) sont signalés sur la carte des enjeux. Ils n'interviennent pas dans la définition du plan de zonage.

2.2.3 Vulnérabilité

La vulnérabilité, au sens large du terme, exprime le niveau de conséquences prévisibles d'un phénomène sur les enjeux. Les enjeux sont les domaines affectés par le risque : les hommes, leurs biens et les milieux dans lesquels ils vivent. Cette palette des

enjeux varie suivant la nature de l'aléa. Ainsi, lors d'une invasion acridienne, l'habitat n'est pas un enjeu tandis que c'est un enjeu primordial lors d'un séisme. Pour chaque enjeu reconnu, une évaluation des dommages est établie en fonction des niveaux d'aléa. Les enjeux peuvent évidemment être décomposés plus ou moins précisément.

2.2.4 Plan de zonage réglementaire

Le plan de zonage réglementaire est le résultat des différentes combinaisons possibles entre cartes d'aléa et zonage des enjeux Fig. 13

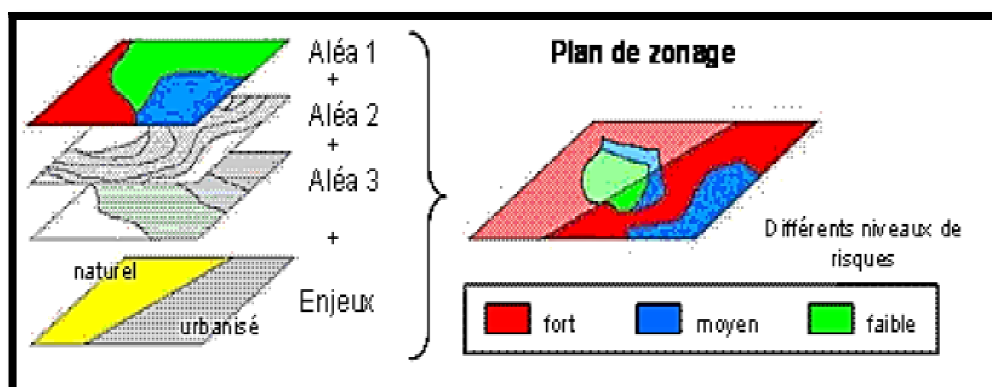


Fig. 13 : Plan de zonage réglementaire

III. Les cavités souterraines

La notion de **cavité souterraine** recouvre les concepts de cavité naturelle ou artificielle, située dans le sol ou le sous-sol.

Selon le contexte social, une cavité souterraine peut être une possibilité patrimoniale (touristique, scientifique, historique, etc.) ou un risque anthropique (effondrement, pollution, perte

3.1.1 Les types de cavités souterraines :

Nous devons distinguer différents types de cavités, en les classant selon leurs origines. Nous 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 a la dissolution de matériaux par la circulation des eaux ; réseaux karstiques ; poches de dissolutions dans les gypses ou dans les sels.

3.2.1 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 a 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



Fig. 14: Karst Fig. 15 : Grotte



Fig. 16 : Gouffre

3.2.2 Cavités de suffusion :

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 les très instables ; de petites dimensions mais pouvant parfois atteindre plusieurs m³ . Les matériaux entraînés sont évacués soit par fissures ouvertes d'un horizon rocheux proche ; soit dans une cavité voisine (vide Karstique ; cave ; ouvrage d'assainissement ; fuyard etc.....).



Fig. 17 : Effondrement d'une zone sous-cavée par suffusion © BRGM



Fig. 18 : Des exemples d'affaissements et glissements à Oran centre

IV. 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 effondrements généralisés ; les fontis ; les suffusions.

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

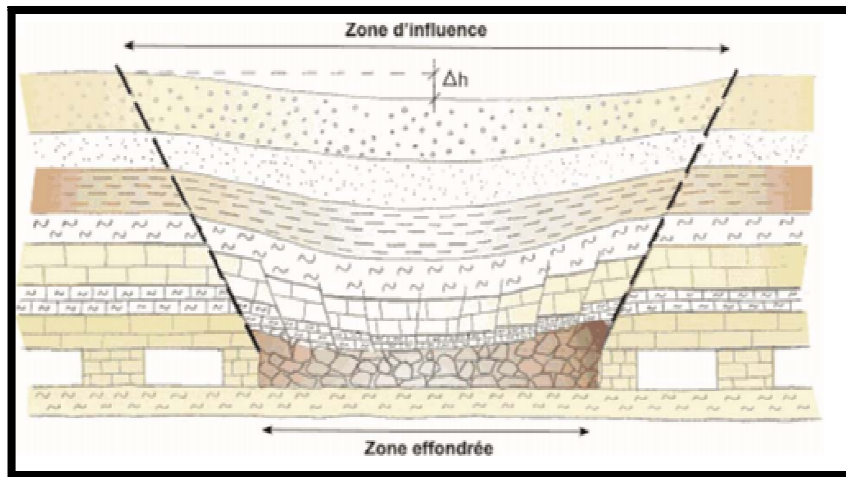


Fig. 19 : illustration schématique d'un affaissement BRGM

2. l'effondrement :

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

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. 20)

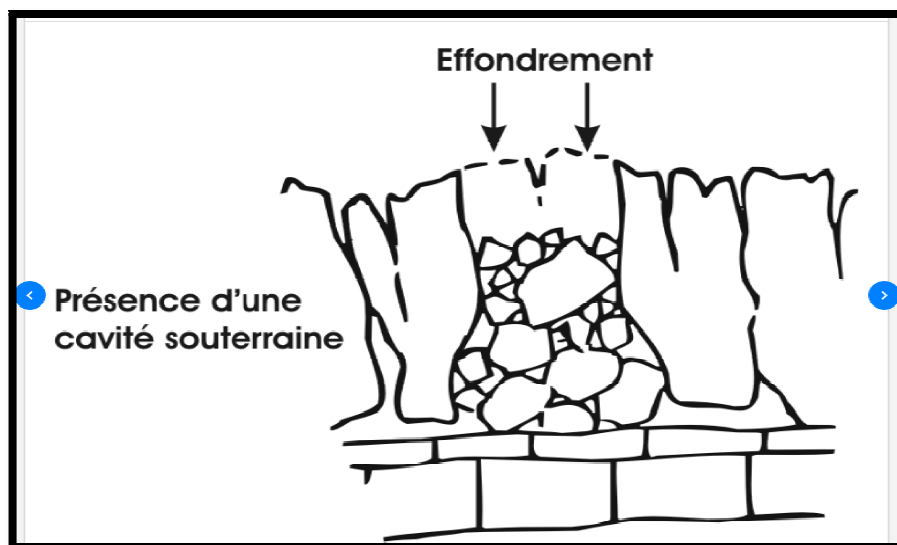


Fig . 20 : Illustrations schématiques d'un effondrement dans un relief karstique

V. Les facteurs de risque d'effondrement

Ce risque peut être exacerbé :

Dans les zones sismiquement vulnérables et 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 carrière situées sous le niveau supérieur d'une nappe ; quand les pompes de dénoyage sont arrêtées).

1. Fontis :

Le fontis correspond à un effondrement brutal mais localisé se manifestant sous la forme d'un entonnoir ou d'un cratère. Il est 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. 20. 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 de la rapidité et des dimensions du phénomène (Fig. 21)

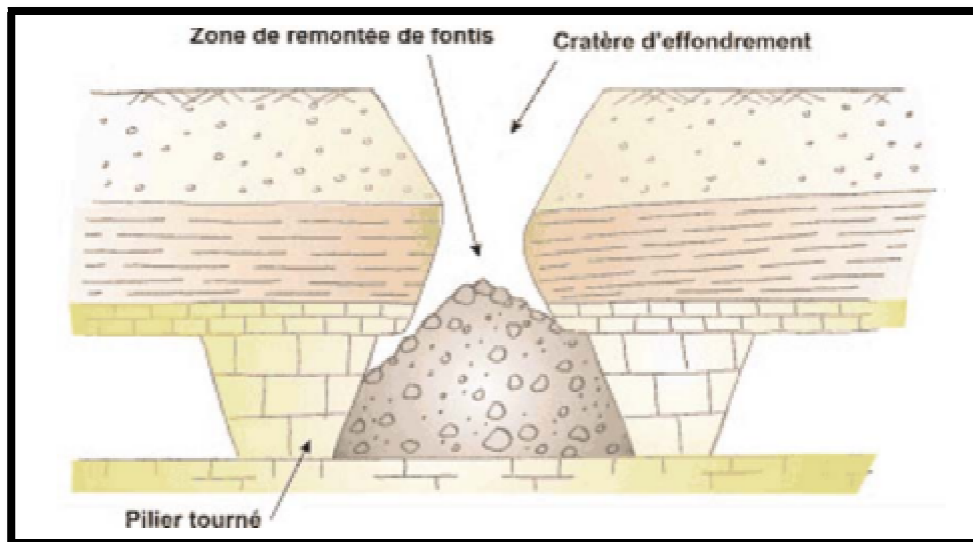


Fig. 21 : Illustration schématique d'un FONTIS© BRGM

2. Suffosion

Ce phénomène d'érosion interne qui affect principalement les sables et limons. Cela consiste en un entrainement des particules (d'abord assez fines) dans la masse de sol du fait de circulation 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 provoqué par une circulation naturelle d'eau ; mais elle est plus fréquente au droit de canalisations enterrées fuyardes.

VI. Le principe du processus de dissolution :

La chimie des carbonates et des sulfates est essentielle pour comprendre la formation des fréquentes formes géomorphologiques pouvant entrainer des risques potentiels d'affaissement ayant des impacts sur les infrastructures du tissu urbain. Le processus physico-chimique donne lieu a une déformation en superficie, qui consiste en la dissolution de l'eau. l'existence en profondeur d'une couche imperméable (marnes, schistes ou argiles) , entraine une accumulation de la circulation d'eau sur celles-ci , en augmentant le processus de dissolution des formations carbonatées et gypseuses. On distinguera trois étapes (Fig. 22) :

- Etape A : Interaction eau- roche
- Etape B : Dissolution de la formation géologique (Calcaire ou gypse)
- Etape C : Dépression en surface

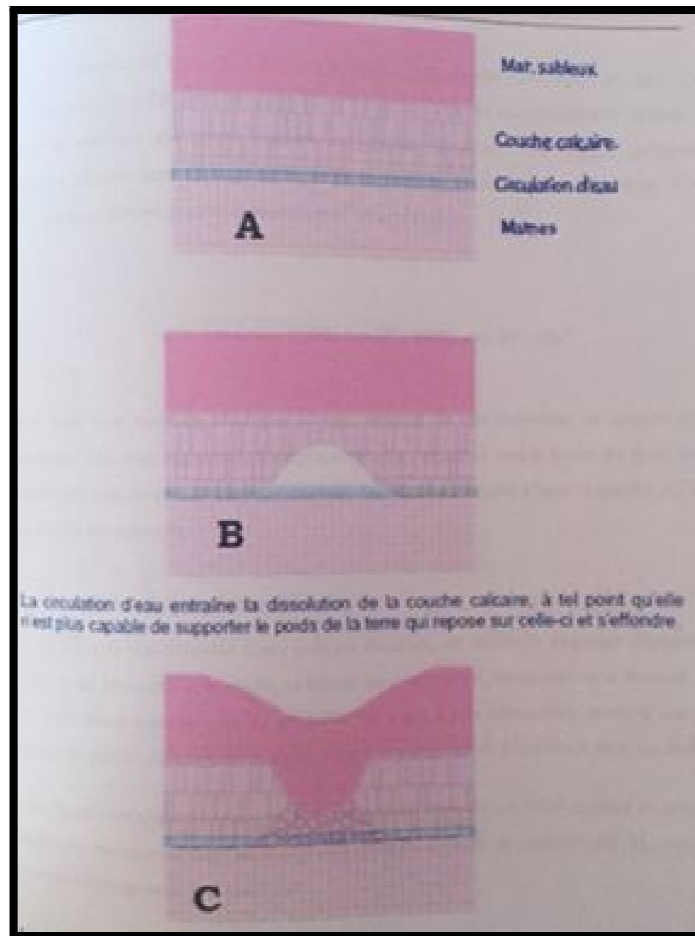


Fig.22 : Processus de dissolution des formations carbonatés et gypseuses

- **Processus géochimique de formation gypseuse dans les roches sulfaté :**

- 1. Formation et composition du gypse :**

- 2. Composition du gypse :**

Le gypse est une roche blanche, d'aspect mat, finement cristallin, tendre (rayable à l'ongle) et de densité 2,3. Quelques traces jaunes de soufre peuvent apparaître. Il est constitué en majeure partie de sulfate de calcium hydraté ($\text{CaSO}_4 \cdot 2(\text{H}_2\text{O})$). En France, le gypse est très pur (souvent 98%) et ne nécessite pas de purification lors de son exploitation.

Remarque : Les couches les plus profondes de gypse peuvent perdre leur eau de cristallisation. On obtient alors une roche composée de sulfate de calcium non hydraté (CaSO_4) appelé : Anhydrite.



Fig. 23 : Cristal de gypse

composition:

$\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$: 91,5 % , MgCO_3 : 1 % , CaCO_3 : 6 % , Argile et silice : 1,5 %

Le gypse peut cristalliser sous des formes très diverses. En Ile-de-France, les formes les plus courantes, sont le **gypse saccharoïde** (à aspect de sucre) et les cristaux en "**pied d'alouette**" ou "**fer de lance**" qui se forment dans les couches de marnes séparant les masses gypseuses.



Fig.24 : Gypse saccharoïde



Fig.25 : Gypse "fer de lance"

3. Formation du gypse :

Le gypse est une roche **sédimentaire évaporitique**. Il se forme au niveau des **lagunes** et parfois des lacs salés des régions semi-arides (ex : Lacs du salar d'Uyuni en Bolivie). Dans les deux cas, de l'eau salée se retrouve piégée temporairement sans alimentation en eau douce. L'eau va alors s'évaporer rapidement. Ceci entraîne le dépôt des sels (Ca^{++} , sulfates) qui étaient dissous dans l'eau . On le classe donc, d'un point de vue chimique, dans les **sels**.

La formation du gypse d'Ile-de-France est controversée. Les conditions de formation correspondent à celles décrites ci-dessus. Par contre l'origine du sulfate de calcium ne serait pas marine ! Ces sulfates proviendraient d'un ancien **gisement gypsifère**, situé à l'est de la France, qui se serait déposé au **Trias**. Il aurait subi une érosion via les eaux de surface qui auraient transporté ces sédiments jusqu'en milieu marin où ils se seraient redéposés.

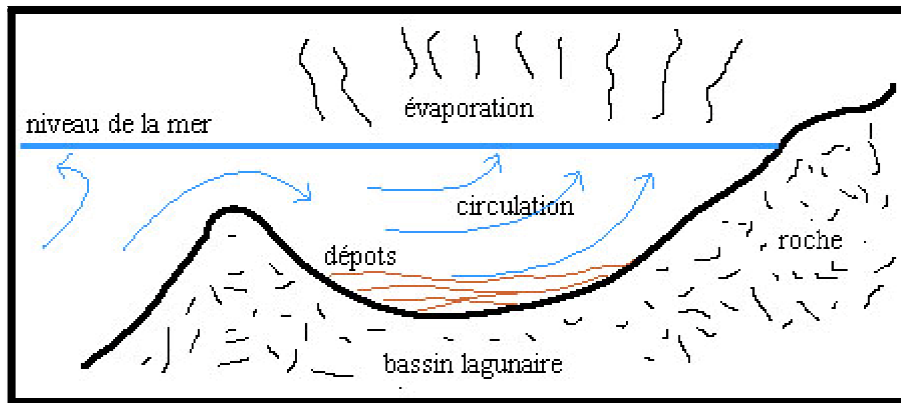


Fig. 26 : Mécanisme de formation du gypse en milieu marin lagunaire

4. Dissolution du gypse :

La vitesse de dissolution reste significative et une cavité est susceptible d'évoluer plus rapidement . Ce phénomène est observé au niveau de la localité d'EL Kerma (Fig. ...) , au sud d'Oran , représentant un exemple de dissolution de gypse au sein d'un sol limono-argileux a cristaux de gypse . Dans ces milieux , un effondrement brutal en surface peut avoir lieu . C'est le cas des fréquents affaissements observés au niveau de l'aéroport , d'Es Sénia , El Kerma .



Fig. 27: Cavité Karstique suite a la dissolution du gypse a El Kerma.

5. 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° 28) 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 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 a une décompression plus ou moins importante en profondeur. Dans le cas contraire ; le fontis se propage jusqu'en surface ; engendrent des mouvements de terrains pouvant endommager les infrastructures présentes.

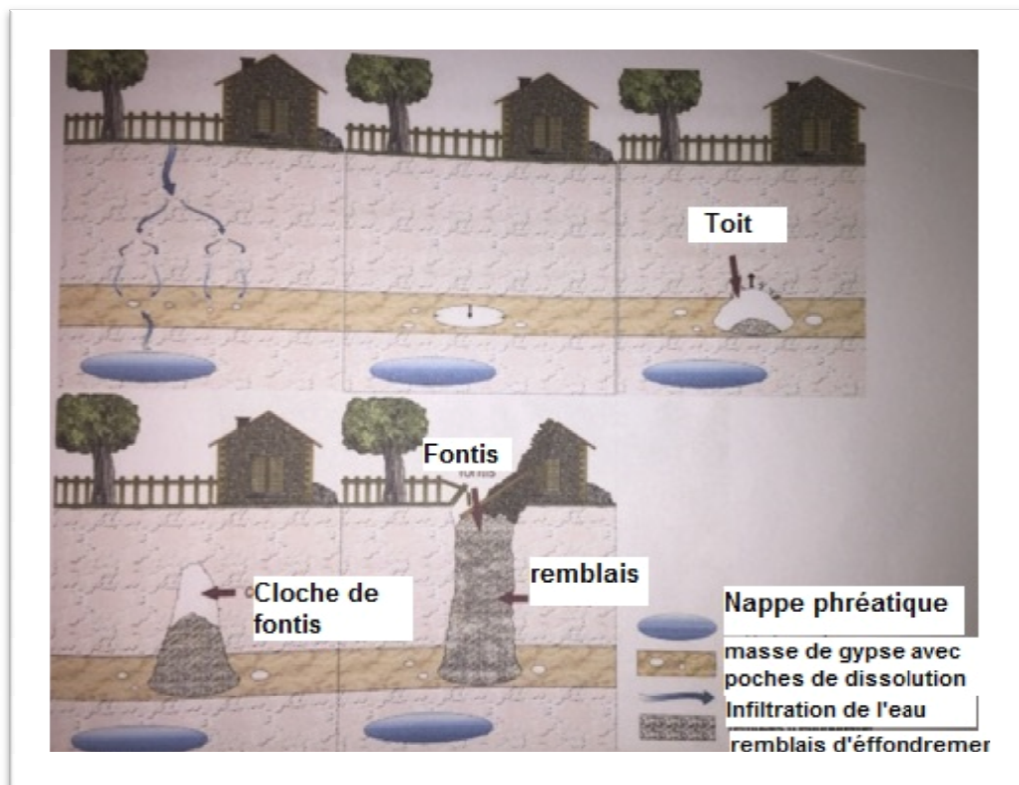


Fig . 28 : Le mécanisme d'un fontis du a la dissolution du gypse .

6. 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 située sous un recouvrement important (le foisonnement des terrains superficiels amortit alors la remontée du vide)

7. Les sondages de reconnaissance :

- **DONNEES GEOLOGIQUES / CONTEXTE GEOLOGIQUE DE LA REGION :**

Selon la carte géologique d'Oran feuille n°153 à l'échelle 1/50.000ème), et d'après le sondage carotté réalisé sur le site, le terrain objet de la présente étude appartient au quaternaire continental représenté par des amas éoliens avec du gypse autour des dépressions inondées couvrant des alluvions.

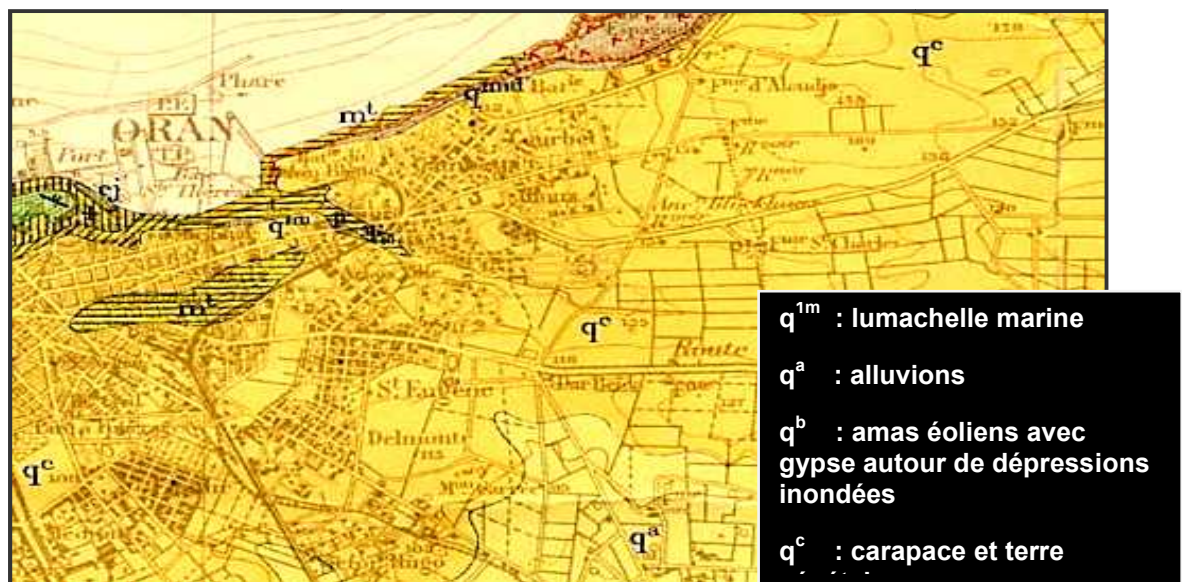


Fig. 29 :Extrait de la carte géologique de la région d'Oran au 1/50.000e (Golurinar, 1952)

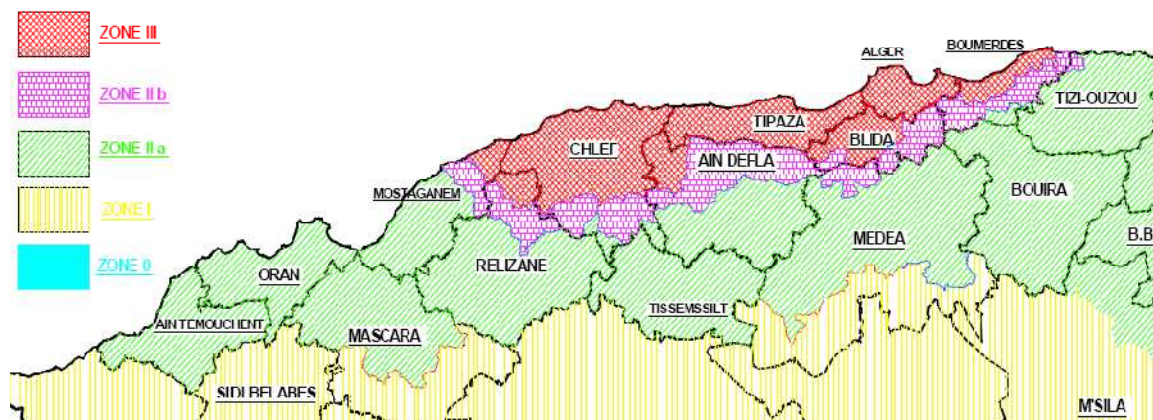
8. Les risques géologiques de la région d'Oran :

La région d'Oran, de par sa complexité morpho-structurale et son activité sismo-tectonique, présente des risques géologiques liés à la nature de ses terrains qui menacent l'instabilité de sites urbains. Classée parmi les zones littorales les plus exposées, la région d'Oran est caractérisée par l'existence d'un réseau de failles qui, lors de leur rejet vont engendrer des glissements, des affaissements et des éboulements au niveau des falaises (falaise de Canastel) et des zones de piedmonts (faille de la Calère d'Oran, tunnel près de la pêcheurie).

D'autres phénomènes particuliers, liés étroitement à l'hydrogéologie urbaine (écoulements de surface et souterrains), s'ajoutent aux risques géologiques, notamment les phénomènes de dissolution de certaines formations géologiques par les eaux d'infiltration.

9. CLASSIFICATION SISMIQUE :

Le territoire national est divisé en cinq (05) zones de sismicité croissante et dont la figure ci-dessous représente la carte des zones sismiques de l'Algérie et le zonage global des Différentes wilayas. Une classification sismique par wilaya et par commune lorsque la wilaya est partagée entre deux zones sismiques différentes ou plus est comme suite :



Zone	Sismicité
Zone 0	Sismicité négligeable
Zone I	Sismicité faible
Zone II (IIa – II b)	Sismicité moyenne
Zone III	Sismicité élevée.

Fig. 30 : Carte de zonage sismique du territoire national (d'après CGS 2003)

La wilaya d'Oran et plus précisément le site objet de cette étude ; fait partie de la zone II.a c'est-à-dire une zone a sismicité moyenne.

- **Reconnaissance " IN SITU" :**

- 1. Organisation et types de la reconnaissance :**

La campagne de reconnaissance géotechnique préconisée et menée par le L.T.P.O sur site a comporté l'exécution des essais suivants :

- Quatre (04) sondages carottés notés de SN. 1 a SN.4 de 15.00 m de profondeur ; avec prélèvements d'échantillons pour éventuels essais en laboratoire.
- Deux sondages préssiométriques de 20.00m de profondeur ; notés SP.1 et SP.2 . Dans ces sondages ; une série d'essais préssiométrique a été réalisée a raison d'un essai tous les un métre a partir du premier mètre 1.00 m de profondeur jusqu'à 20.00m
- Deux cent vingt-deux (222) essais de pénétration dynamique . notés de k1 a k222 ; poussés jusqu'aux refus ou stoppés a 12.0 m de profondeur (12.0 m étant la profondeur d'investigation programmée) au moyen du pénétromètre dynamique automatique lourd.
- Deux (02) piézomètres ont par ailleurs été posés aux droits des sondages SN.3 et SP.1 pour suivre et contrôler une éventuelle présence d'eau dans le sol.

Un schéma d'implantation du sondage carotté ; et des essais pénétrométriques annexé au présent rapport.

2. Interprétation des résultats des essais " in-situ" :

- **Sondage carotté :**

Les sondages carottés ont traversé la succession de terrains suivants :

- **Sondage SN.1 :**

0.00m a 0.60 m : terre végétale + remblai

0.60 m a 15.00 m : Argile gypseuse beige brunatreabrunatre ; alternée de passées de croutes gréso- gypsifères par endroits.

- **Sondage SN.2 :**

0.00 m a 0.40 m : Remblai + Terre végétale

0.40 m a 15.00 m : Argile gypseuse beige brunatreabrunatre ; alterné de passées de croutes gréso –gypsifères par endroits.

- **Sondage SN. 3 :**

0.00m a 0.70 m : Terre végétale

0.70 m a 15.00 m : Argile gypseuse beige brunatre a brunatre

- **Sondage SN. 4 :**

0.0 m a 0.30 m : Terre végétale

0.30 m a 15.00 m : Argile gypseuse beige brunâtre a brunâtre ; alternée de passées de croutes gréso-gypsifères vers le sommet et par endroits.

- **Sondage SP. 1 :**

0.0 m a 0.50 m : Remblai + Terre végétale

0.50m a 20.00 m : Argile gypseuse beige brunâtre , alternée de passées de croutes gréso-gypsifères vers le sommet et par endroits

- **Sondage SP. 2 :**

0.00m a 0.60 m : Terre végétale

0.60 m a 20.00 m : Argile gypseuse beige brunatreabrunatre ; alternée de passées de croutes gréso-gypsifères vers le sommet et par endroits.

3. Essais de pénétration dynamique :

Deux cent vingt-deux (222) essais de pénétration dynamique ; notés de K222 ; poussés jusqu'aux refus ou stoppés a 12.0 m de profondeur (12.0 m étant la profondeur d'investigation programmée) au moyen du pénétromètre dynamique automatique lourd ont été dans le cadre de ce projet

Les allures des diagrammes pénétrométriques obtenus sont semblables traduisant une certaine homogénéité du point de vue compacité dans la succession des couches traversées.

En effet ; la majorité des essais a atteint la profondeur d'investigation programmé (12 m) ; a l'exception de quelques essais qui ont connu des refus superficiels situés entre 1.20 et 3.40m.

Les refus obtenus sont causés probablement par la croute gréso-gypsifère mises en évidence par les sondages carottés réalisés (voir rapport d'étude géotechnique)

Les valeurs de résistance de pointe "Rp" enregistrées varient d'une manière irrégulière en oscillant en une allure de dents de scie avec des valeurs minimales de 5.70 a plus de 148.20 bars dépassant les 200 a 250 bars.

Des pics de "Rp" de l'ordre de 200 a plus de 400 bars ont été enregistrés a certains niveaux caractérisant des points indurés

Ces essais pénétration dynamique ont permis de mettre en évidence la présence de niveaux fortement altérés et/ ou décomprimés au sein des formations naturelles en place . Ces altérations sont a relier a la présence d'eau et d la nature argileuse des formations naturelles en place.

Des vides francs ("Rp" = 0.0 bars) ont également été mis en évidence au droit de quelques essais de l'essai

Ces essais réalisés ont permis de mettre en évidence un sous-sol composé de forte épaisseur de formation naturelle (argile brunatregypseuse) de faible a moyenne compacité.

Niveau d'eau :

Selon le relevé piézométrique effectué en date du 27.04.2017 , au droit du sondage SN.3 ; l'eau se trouvait a (1.90 m) sous le niveau actuel du terrain.

Il est important de souligner que le niveau de l'eau dans le sol est susceptible de fluctuer considérablement selon les saisons et /ou les conditions climatiques locales et que seule la prise de lectures a différentes périodes de l'année permet d'établir le niveau de la nappe

- **Essais préssiométriques :**

Les essais préssiométriques ont été réalisés aux niveaux des trous des sondages SP1 et SP2 a raison d'un essai tous les 1.0 m a partir du premier mètre jusqu'à 20.0 m de profondeur.

a) Définition de l'essai préssiométrique

L'essai pressiométrique régi par la norme (NF 94 _ 110) est un essai de chargement statique du sol ; effectué grâce a une sonde cylindrique dilatable radialement introduite dans le trou du forage.

Cette sonde est constituée par un cylindre métallique fondu contenant en son centre une cellule dilatable radialement par injection d'eau dont la variation de volume est mesurée au volumétrie.

L'application d'une pression croissante exerce donc sur les parois du trou de forage un champ de contrainte cylindrique et uniforme. L'essai préssiométrique permet d'établir la courbe de variation des déformations volumétriques : le module pressiométrique (E) exprimé en bar ; la pression de fluage (Pf) exprimée en bars ; la pression limite (PI) exprimée en bars la pression limite (PI*) exprimée en bars et le rapport E/ PI permet d'estimer l'état de consolidation du sol considéré.

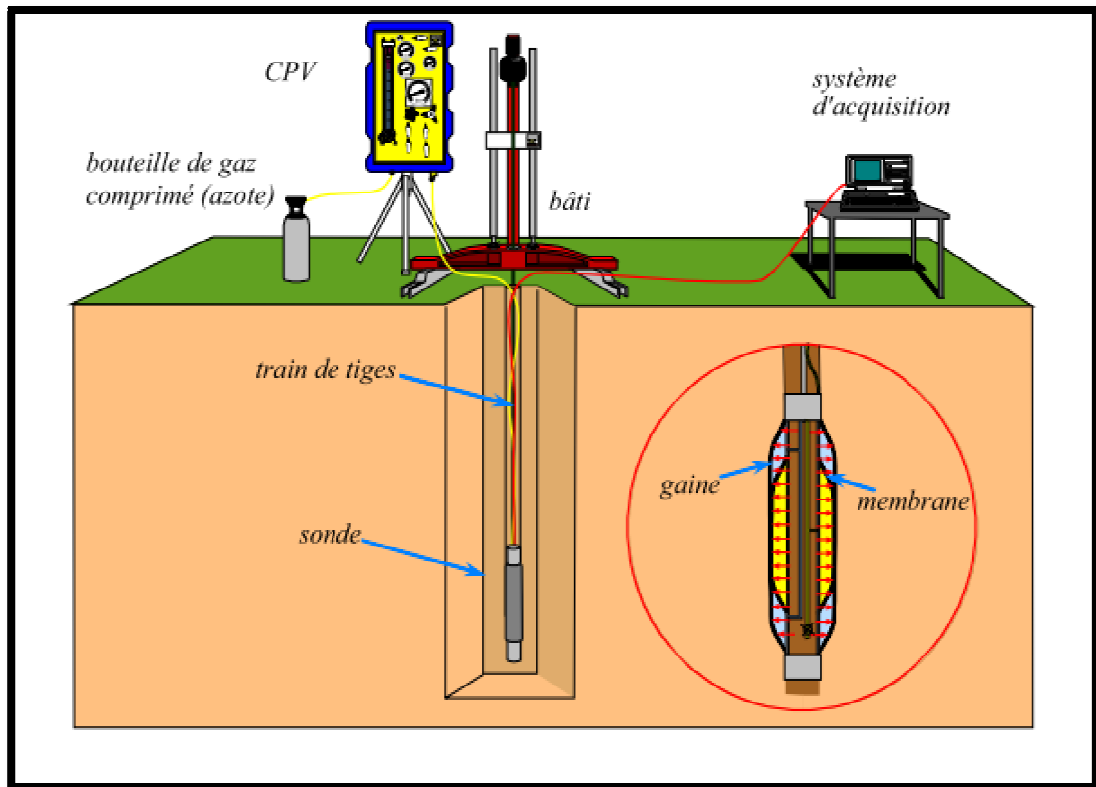


Fig. 31 : illustration schématique d'un essai préssiométrique

- Sondage SP.1 :

Sondage	Prof (m)	PI (bars)	PI* (bars)	Pf (bars)	E (bars)	E/PI	Horizons	État de serrage
SP.01	1.00	15.7	15.6	12.8	451	28.7	Argile gypseuse beige brunâtre à brunâtre, alternée de passées de croutes grésogypsifères vers le sommet et par endroits	sur consolidé
	2.00	25.8	25.6	21.9	755	29.3		
	3.00	17.9	17.6	12.0	581	32.5		
	4.00	9.9	9.6	6.1	188	19		
	5.00	17.8	17.3	7.0	176	9.9		Normalement consolidé
	6.00	18.1	17.6	7.0	150	8.3		Altéré et remanié
	7.00	28.2	27.6	23.4	632	22.4		sur consolidé
	8.00	10.3	9.5	6.4	579	56.5		
	9.00	9.4	8.6	5.6	251	26.6		
	10.00	1.8	0.9	1.8	4	2.6		Altéré et remanié
	11.00	3.3	2.4	2.4	220	65.6		sur consolidé
	12.00	9.5	8.4	2.0	143	15.1		Normalement consolidé
	13.00	15.7	14.5	5.3	319	20.3		

								sur consolidé
14.00	9.7	8.4	2.7	52	5.4			Altéré et remanié
15.00	11.8	10.5	6.4	89	7.5			
16.00	18.1	16.7	4.0	132	7.3			
17.00	18.0	16.4	4.1	154	8.6			
18.00	2.6	0.9	2.4	10	3.8			
19.00	2.8	1.1	2.2	6	2.2			
20.00	2.8	1.0	2.8	5	1.9			

Tableau 01 : Sondage SP1

Cette étude géotechnique relative a la réalisation d'un parking a étage au niveau de l'aéroport d'Oran Ahmed Ben Bella dans la daïra d'Es Senia ; wilaya d'Oran ; nous a permis de déterminer la nature géologique des formations rencontrées en place et de préciser aussi le contexte géologique du site .

Sur la base des résultats fournis par les différents essais " in situ " et sondages carottés réalisés dans le cadre de cette étude ; nous avons fixé un taux de travail admissible applicable au sol ; un ancrage ainsi qu'un type de fondation.

Par ailleurs ; des précautions relatives a la stabilité du site et par conséquent celle de l'ouvrage a construire ont également été relatées dans les différents paragraphes du rapport.

Les données contenues dans ce rapport permettront au bureau d'études d'adopter les dispositions constructives adéquates au projet a réaliser.

Le L.T.P.O et l'ingénieur chargé d l'affaire restent a la disposition du client pour tout renseignement complémentaire jugé utile concernant cette étude.



Fig. 32 : la zone d'étude ou les différents sondages ont été pris (image satellitaire de Google ; Earth ; 2001)

APPORT DU GEORADAR A LA
RESOLUTION AUX PROBLEMES DES
RISQUES URBAINS

I. Radar ou GPR (Ground Penetrating Radar):

I.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 canalisations souterraines .(Davis et Annan , 1989) . En hydrogéologie, le GPR est employé pour localiser des zones fracturées et accidentées des cavités souterraines, des zones karstique. 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...).

II. 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 propagation dans le matériau ausculté et réflexion sur 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 e 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.

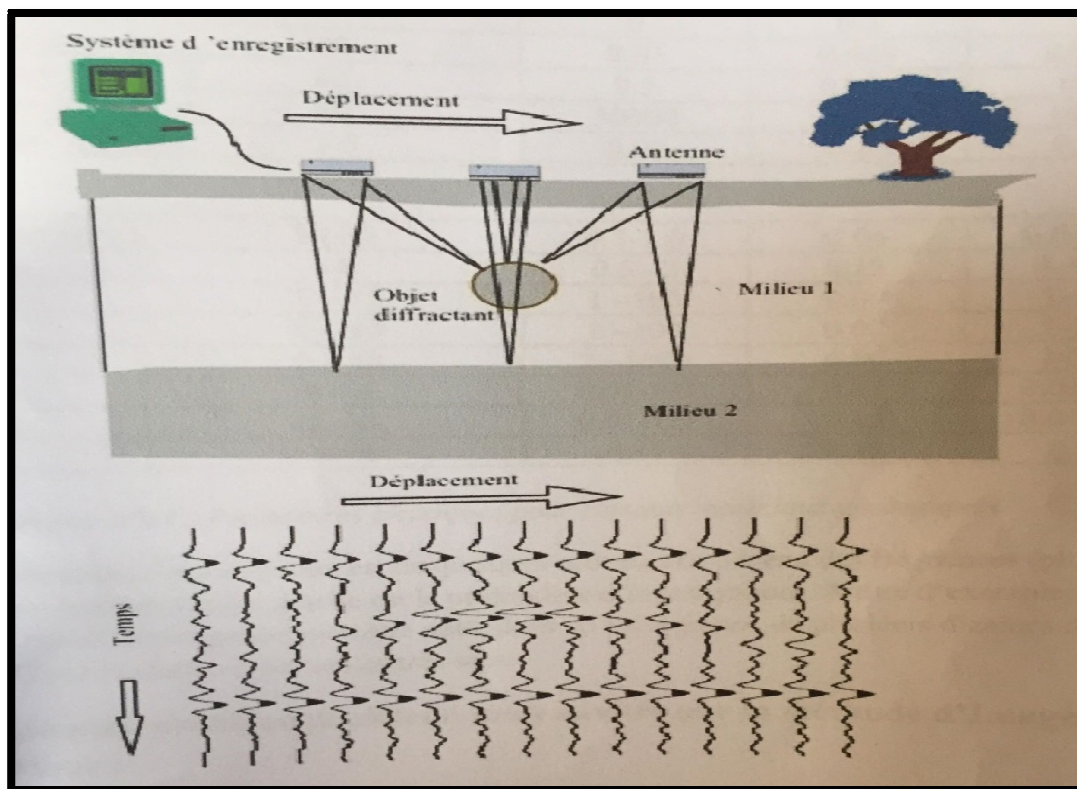


Fig. 33 : Schéma de principe de fonctionnement du GPR

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) par rapport au milieu encaissant.

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

Ou, 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°2 : 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.

III. Exemple pratique de détection 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 l'efficacité de cette méthode.

Le site est ter des cavités souterraines naturelles; de type Karstique, qui sont souvent à l'origine d'affaissement ou fontis. A la suite d'effondrement; il a été constaté

qu'elles sont remplies d'air ; de volume de plusieurs mètres cubes ; et de toit variant de 0.8 a 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 Winner. Deux profils ont été exécutés. La fig. n° 42 , 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 a de probables cavités.

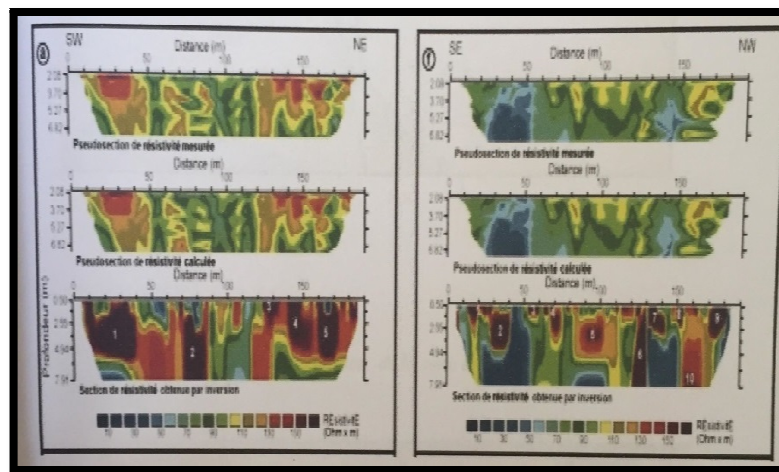


Fig. 34 : Profils de tomographie électrique montrant les cavités. (El Khammari K. et al , 2007)

IV. EXEMPLES PRATIQUES DE DETECTION DE CAVITES DANS DES SITES DE LA REGION D'ES-SENIA ORAN (MAHAMMAD D.ET .AL.2010)

1. PAR LA METHODE ELECTRIQUE :

V. contexte géologique :

La zone étudiée située à une dizaine de km au sud-est d'Oran fig.(n°43) 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 surfaces dues au lessivage par les eaux superficielles des limons gris à cristaux de gypse.



Fig. 35 : Tranchée dans le site montrant son assise représentée par les limons marno-gypseux.

VI. PROBLEME POSE APRES L'EMPLOI DE LA GEOPHYSIQUE ELECTRIQUE :

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 5m de profondeur. Le dispositif winner utilisé d'élongation totale égale à 15m,a balayé une superficie de 2 à 3 hectares suivant des points de mesures et des profils espacés de 5m.la longueur AB choisie devrait investiguer une tranche de terrain épaisse de 1,5à2,5m suffisante pour déceler les anomalies dues à la présence de cavités .La carte d'iso-résistivité (fig. n°44) 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 10à20 ohm m avec cependant certains ilots anomaliques , à l'ouest et à l'est, supérieurs à 20 ohm .

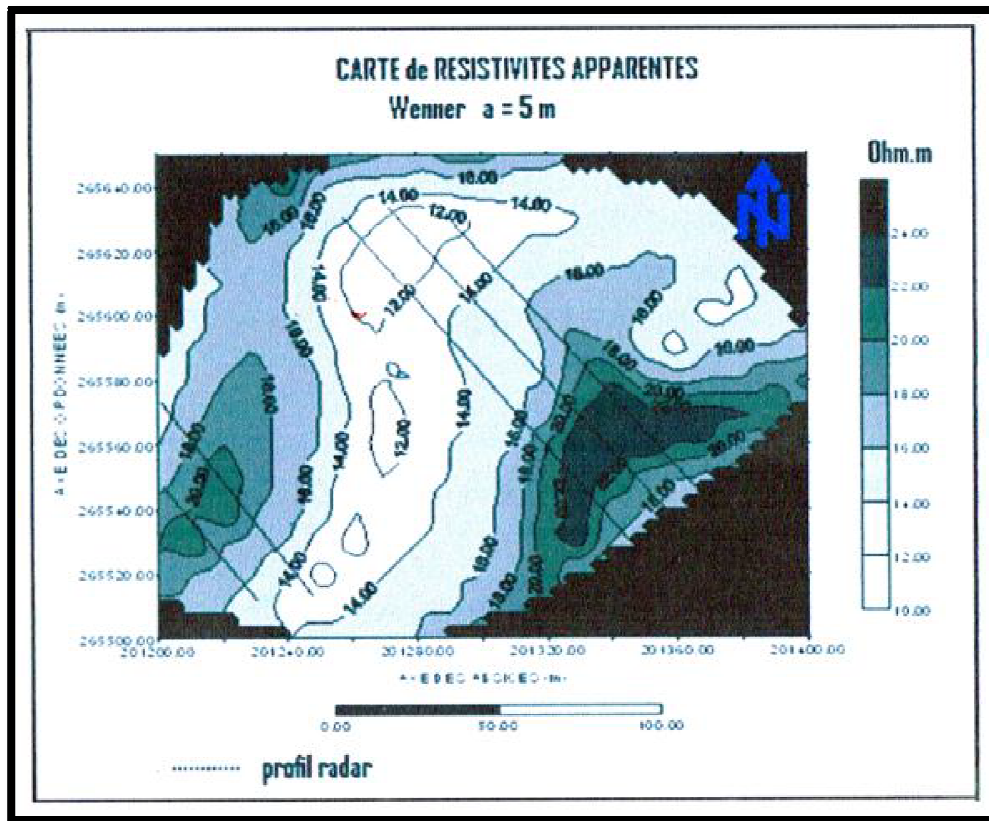


Fig. 36 : La carte de résistivité apparente.

Il a néanmoins été constaté en comparant les secteurs où apparaissent des cavités que les résultats présentés par la carte restaient insuffisants. 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 corrélérer 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 accentuée par leurs 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.

1. Utilisation du Géo-radar :

2. Acquisition des données :

L'appareillage servant à l'acquisition est de marque Ramac-Mala-Géoscience ; d'origine suédoise ; et comprend (Fig n° 37)

- Une gamme d'antennes blindées (émettrice –réceptrice) dans le même boîtier de fréquence 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 , 100 MHz ; qui atteignent des profondeurs maximales ; respectivement de 3 à 5 m ; et de 7 à 10 m.

- 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) tracté l'ensemble pour l'antenne 500 Mhz ou l'antenne 100 Mhz est tirée par des harnais accrochés à l'opérateur.

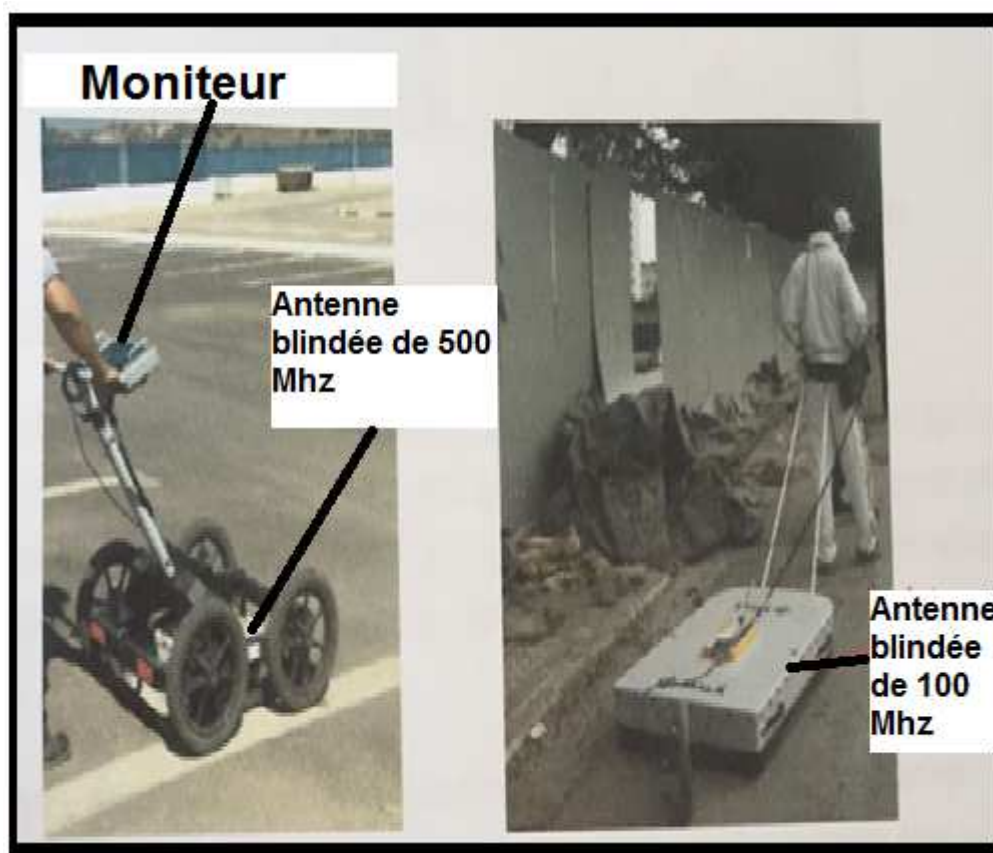


Fig. 37: L'appareillage pour l'étude des cavités.

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

3. Traitement du radar grammes :

Un logiciel spécialisé, GroundVision2, permet d'effectuer des opérations sur les radar gramme , 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° 46)

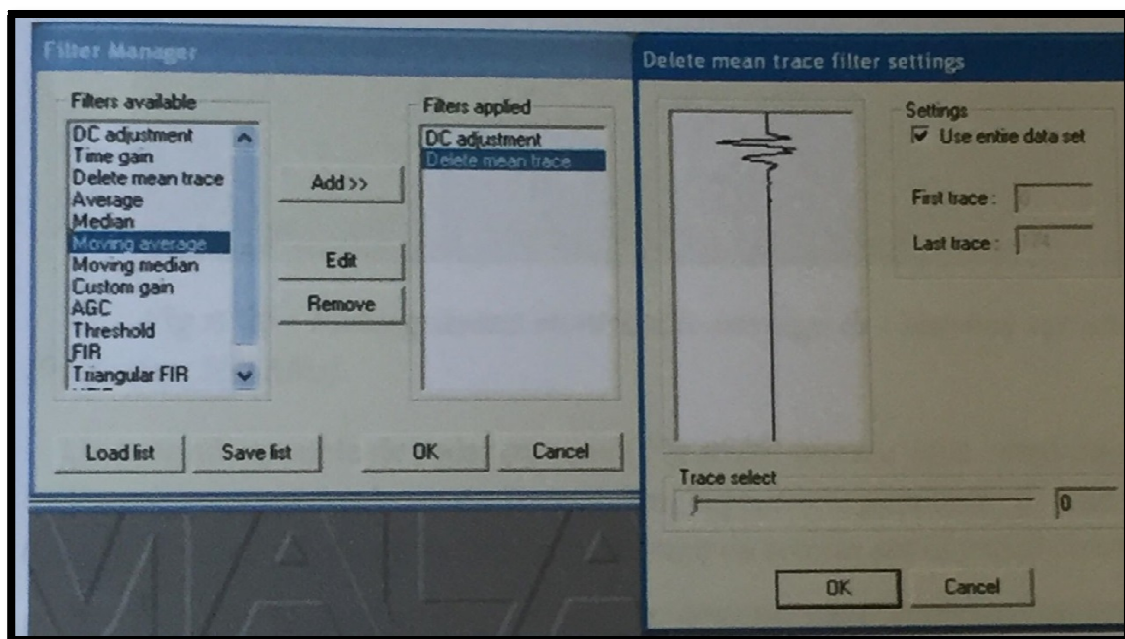


Fig. 38 : Gestionnaire des différents filtres du signal radar

4. 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 mis 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° 39)

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

Le reste du radar gramme montre des signaux quasi-horizontaux dus 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 a 4 m.

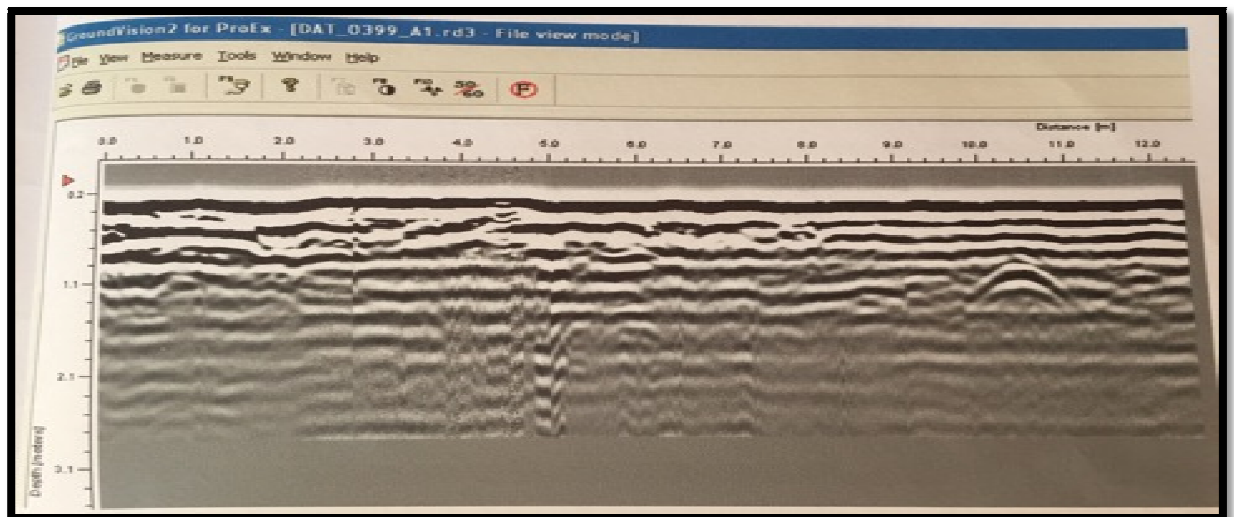


Fig. 39: Radar gramme montrant le passage de l'antenne sur une canalisation
(fréquence 500 Mhz)

Un second exemple de radar gramme (Fig n°48.) montre deux canalisations , l'une au-dessus de l'autre , aux profondeurs de 1m et 1.7 m , la première paraissant de diamètre plus grand . Au-dessus, l'on note distinctement le remblayage du terrain sur la tranchée creusée.

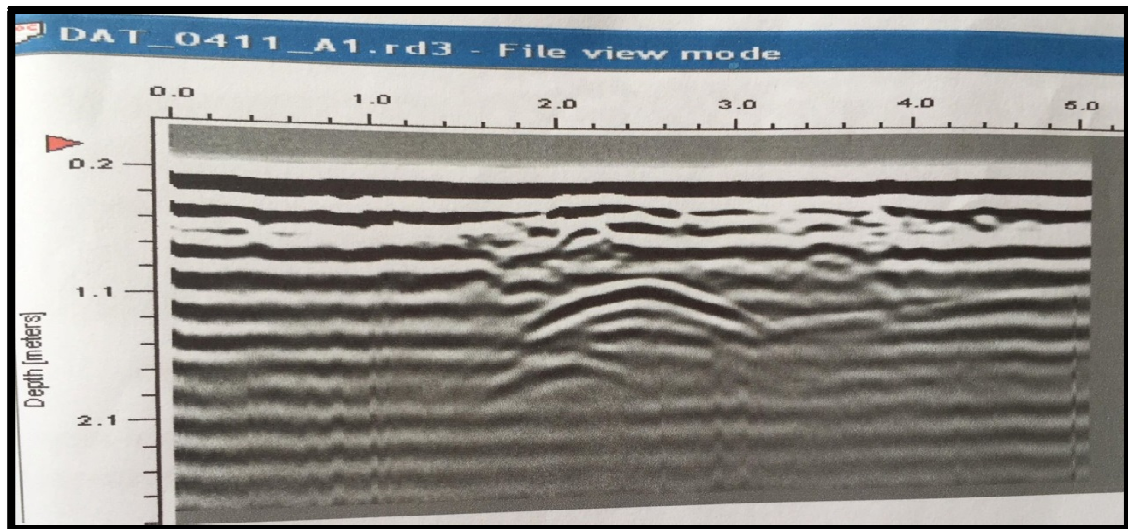


Fig .40 : Radar gramme montrant deux canalisations superposées

5. Détection de cavités sur des sites projetés de constructions dans la région d'Es-Seina _El Kerma (Oran) :

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

Des tranchées avaient été préalablement creusées sur 1 m a 1.5m de profondeur (Fig n° 41), a l'intérieur desquelles les mesures ont été exécutées avec l'antenne 500 Méga Hertz.



Fig n° 41 : Exemple de tranchée dans laquelle les mesures Radar sont effectuées.

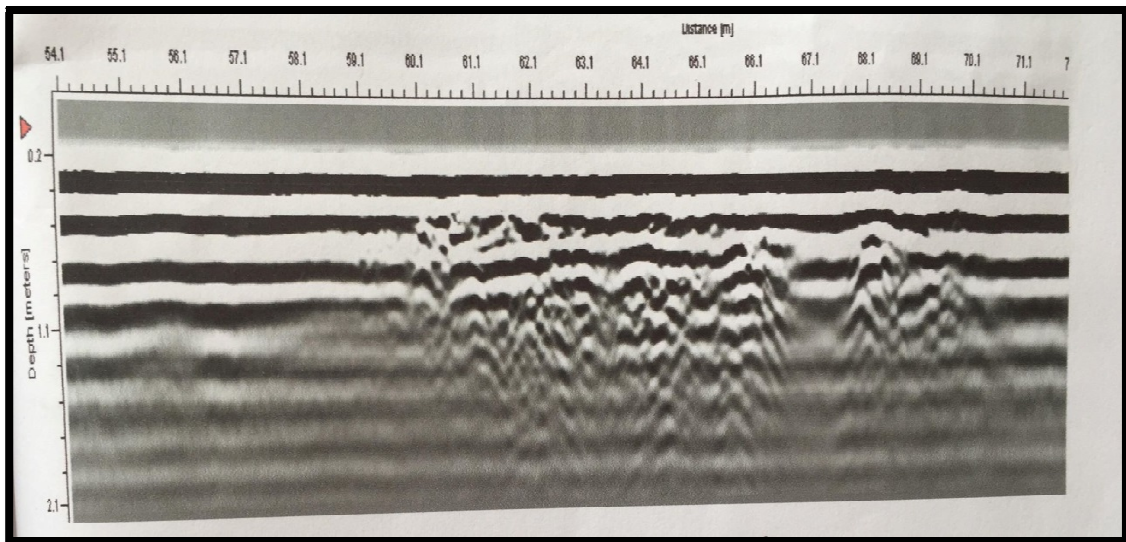


Fig.42 : Radar gramme montrant des signaux anormiques

On note la présence de fortes diffractions de signaux entre les distances 60m et 66m , de même entre 68 m et 70m . La profondeur des signaux perturbés atteint 2 m .Des creusements ont été effectués en ces points détectés par le radar, qui ont mis a nu des cavités qui sont de 2 types Fig. 51

- 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.



Fig. 44 : Processus de dissolution avancé.

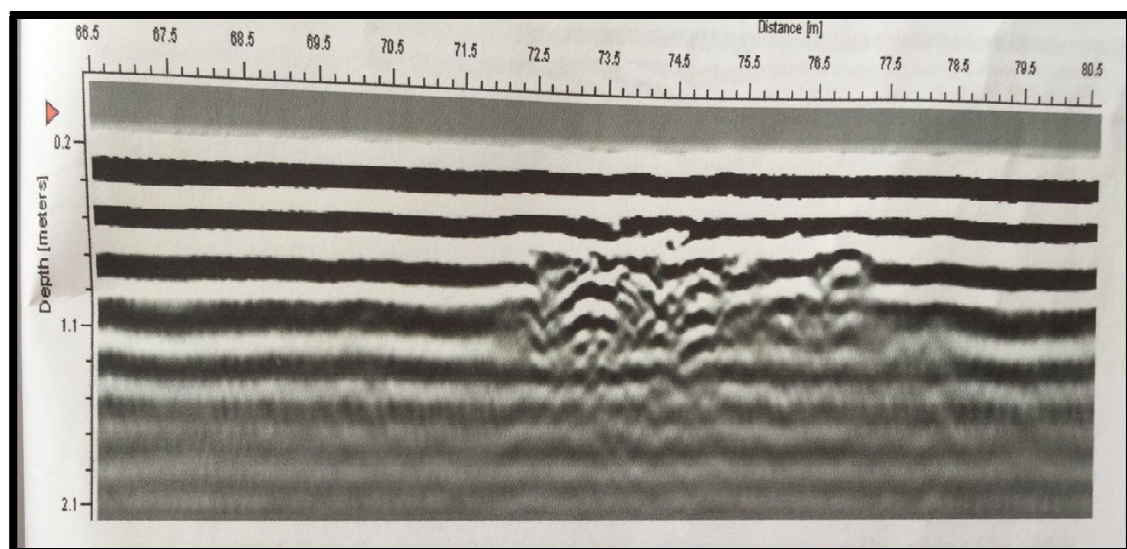


Fig . 45 : Radar gramme montrant une importante anomalie.

Sur un site voisin toujours à senia ; nous observons des signaux anomaux entre 72 m et 75m , dus a une cavité probablement comprise entre 0.5m et 1.5 m de profondeur (Fig. 54).

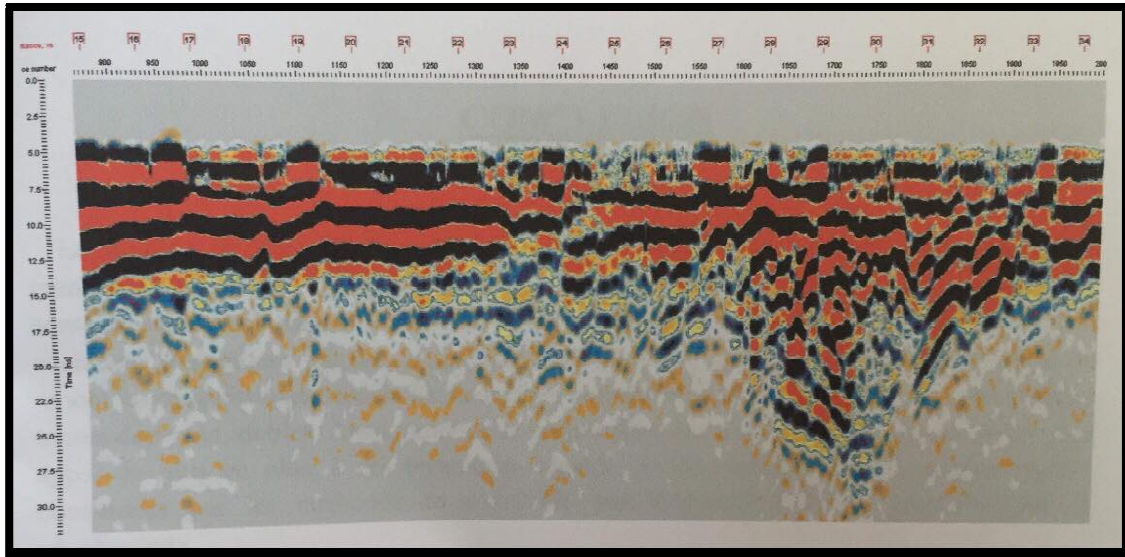


Fig . 46 : Des signaux anomaux entre 72 m et 75m

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

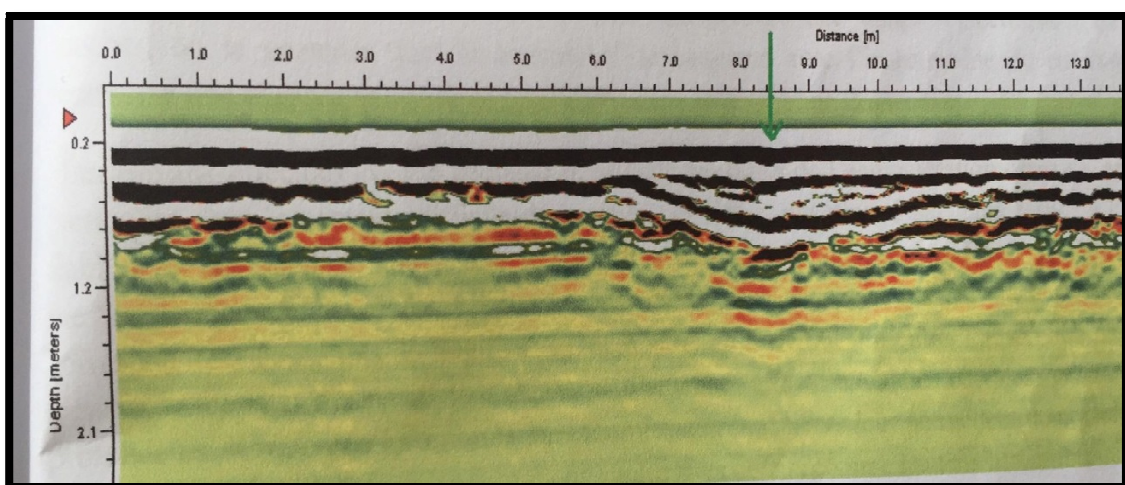


Fig. 47 : Affaissement des couches rendues par les signaux Radar

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 .

6. Logiciel de traitement des Radar grammes

Après la saisie des mesures effectuées sur le terrain le long de profils longitudinaux et transversaux, celles-ci numérisées seront soumises à un traitement informatique pour faire apparaître les radar grammes. Ce traitement est exécuté par les logiciels GroundVision ou Rad Explorer. Un exemple de profil est donné ci-après avec les différentes étapes du traitement

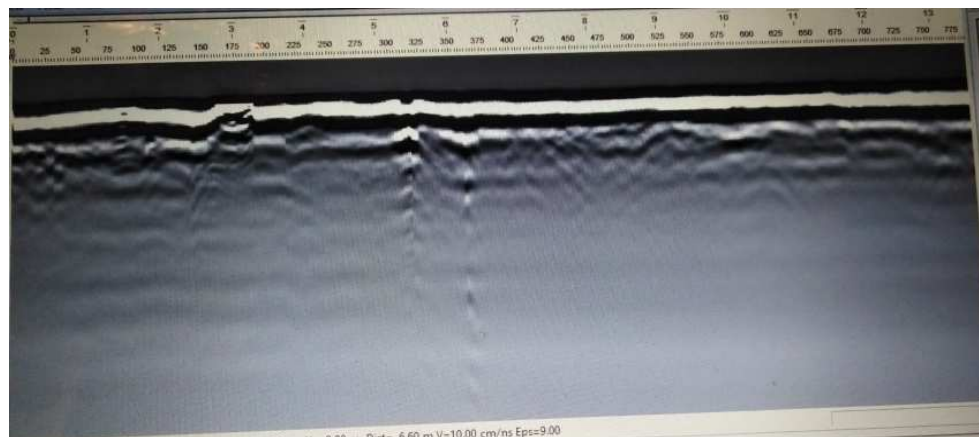


Fig.48 : Radar gramme original visualisé par le logiciel

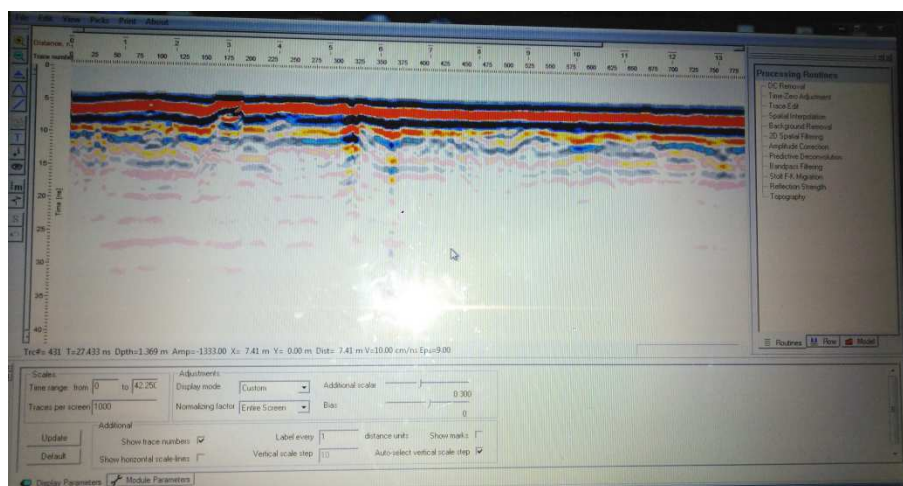


Fig. 49: Le même radar gramme avec application d'une palette de couleurs pour mieux mettre en valeur les signaux parmi lesquels certains peuvent représenter des anomalies.

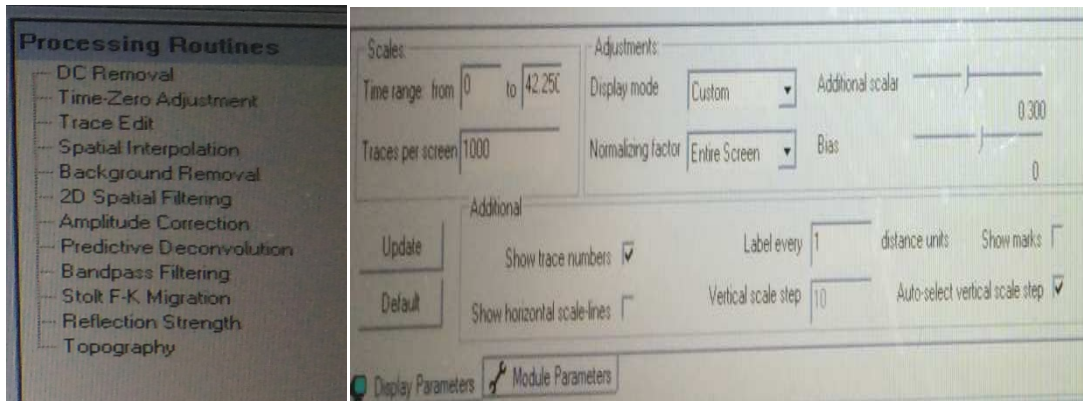


Fig. 50 Liste des différents filtres susceptibles d'être appliqués (à gauche) et paramètres de calibrage des radar grammes (à droite)

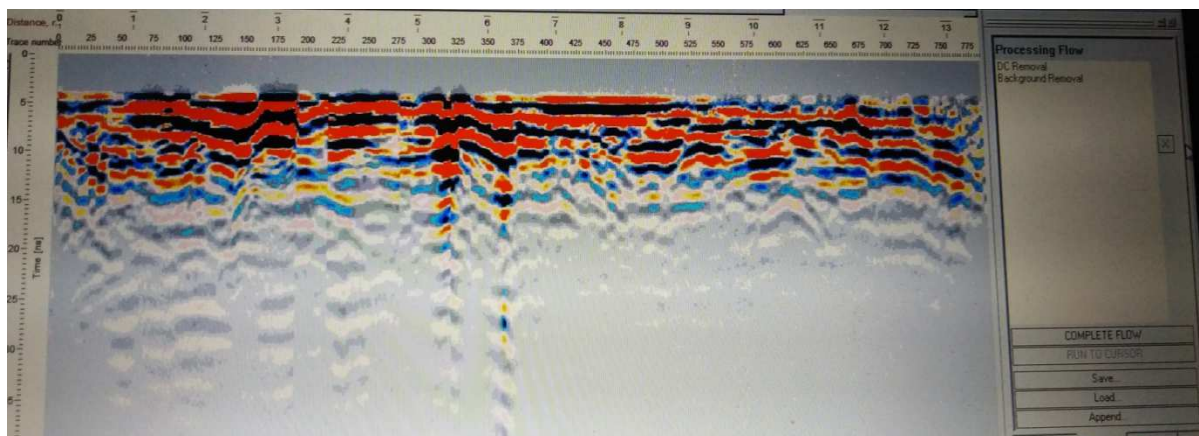


Fig.51 : Le même radar gramme après

de certains filtres (liste à droite) qui met mieux en évidence certaines anomalies dans la continuité des signaux.

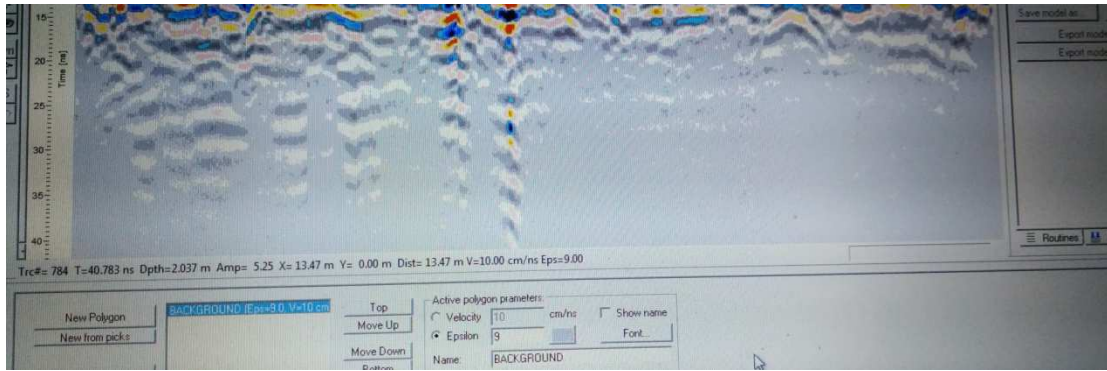


Fig . 52 : Transformation des temps de réflexion en profondeurs en choisissant dans le tableau de paramètres (en bas) une vitesse des ondes électromagnétiques de 10 cm / nanoseconde (correspondant à la permittivité Epsilon égale à 9 pour l’encaissant argileux)

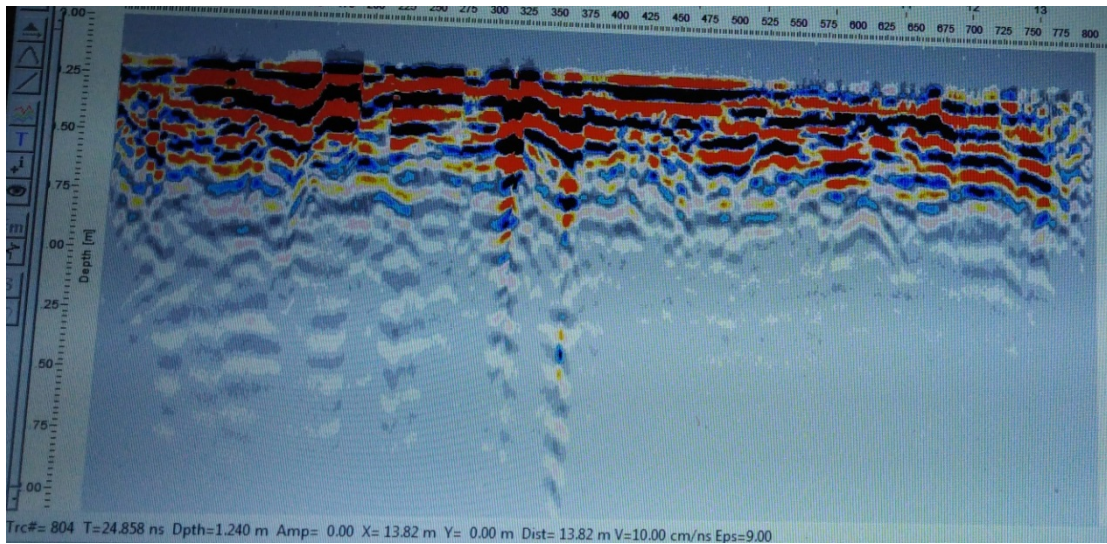


Fig. 53 : Radargramme avec les profondeurs de l’anomalie obtenues par application de la vitesse des ondes EM.

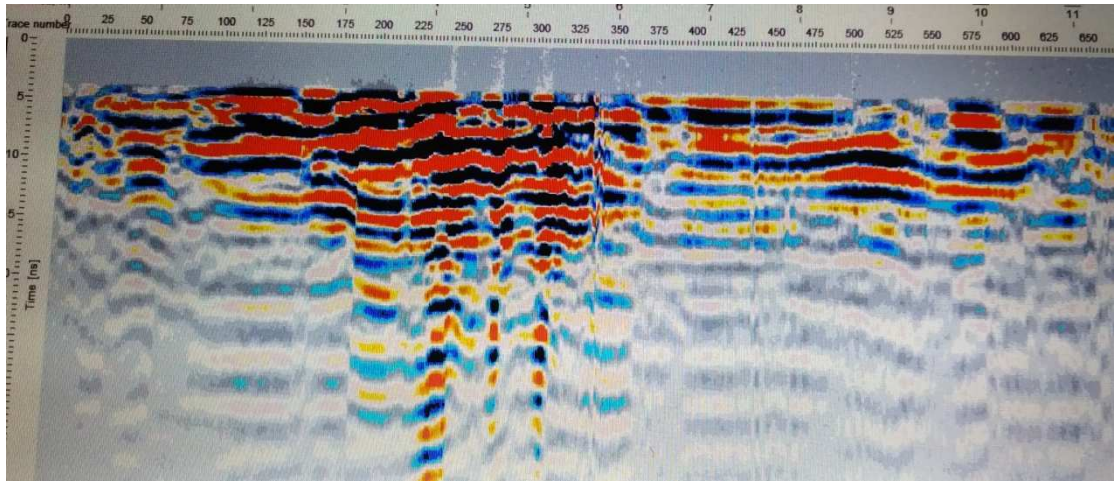


Fig. 54 : Un autre profil représentant une importante anomalie au centre du radargramme.

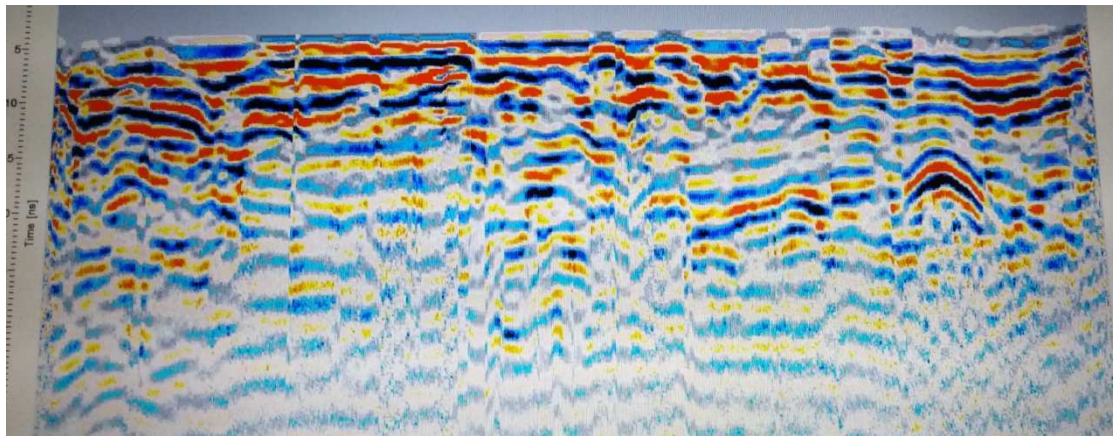


Fig. 55 : A droite sur le radargramme, hyperbole caractéristique d'une canalisation enterré

TRAITEMENT ET MOYENS DE REMEDICATION

VI. Traitement et moyens de remédiation :

1. Principes et objectifs :

Les méthodes de traitement par remplissage des vides représentent des solutions de traitement des cavités souterraines instables. Elles reposent sur des principes de remplissage ou de consolidation de la compacité du terrain par injections de mortiers et de coulis . Les objectifs recherchés concerneront la limitation des mouvements de terrain en surface (affaissement , tassement) particulièrement dans le cas de zones destinées a la construction.

2. Méthodes de comblement des cavités :

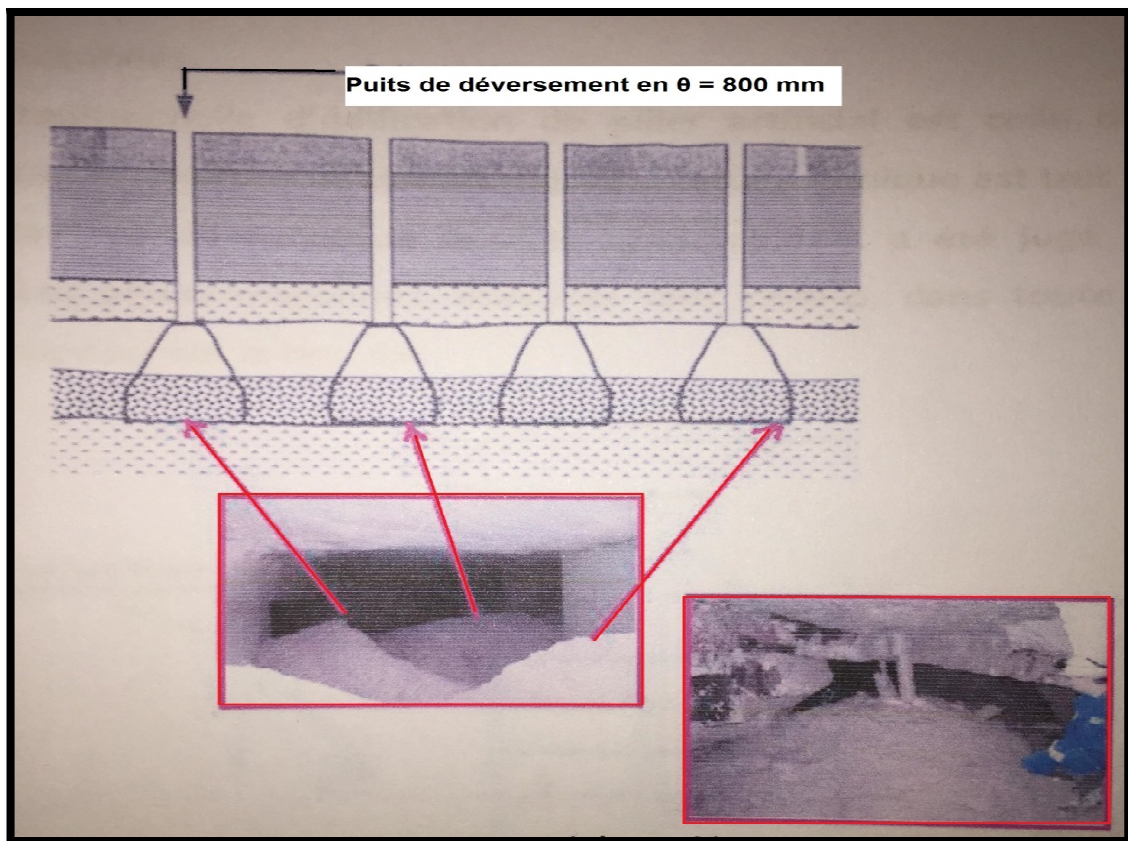
Il existe différentes méthodes de comblement permettant d'assurer le remplissage des cavités. Les méthodes de comblement les plus courantes concernent le remblaiement partiel , le remblaiement direct a partir du fond , par engins mécanisés , le remblaiement gravitaire par simple déversement depuis la surface et le remblaiement par injections de mortiers ou de coulis (sous pression) . Le choix de la méthode est déterminé a partir d'études de faisabilité technique, technico-économique. Les principaux paramètres reposent les caractéristiques géométriques des cavités souterraines (volume) , les conditions opératoires (profondeur , topographie , environnement urbain) et la destination de la surface (projets d'urbanisme , la valorisation du sol) . Pour les opérations de traitement de grande envergure. Il faut souvent envisager la possibilité de combiner plusieurs méthodes selon les spécificités locales du site.

4. Remblaiement partiel :

Les techniques de remblayage partiel consistent a opérer un remplissage progressif de la cavité avec matériaux tout-venant , si possible compactés , jusqu'à une certaine

hauteur prédéterminée . Un vide résiduel parfois important (jusqu'à la moitié de la hauteur) peut être éventuellement laissé à la partie supérieure de la cavité. Le but recherché est d'assurer à moindre coût une amélioration de la stabilité des cavités en maintenant un niveau de sécurité suffisant adapté aux enjeux ainsi qu'une diminution effective du volume des vides (fig. 44) permettant une stabilisation des terrains à long terme par auto comblement des vides (éboulement progressif des bancs du toit).

- Remblaiement direct à partir du fond par engins mécanisés , il s'agit d'un mode de remblaiement classique mis en place , à sec , de remblais tout venant acheminés et déversés par des engins mécaniques. L'objectif de la méthode est de réduire le volume de remplissant les vides originels de matériaux divers , sans adjonction de liant hydraulique. Le principe repose sur un déroulement d'opérations mécanisées simples , à tous les stades : approvisionnement , manutention , déchargement , compactage.



- Fig. 56 : Remblaiement partiel par déversement gravitaire

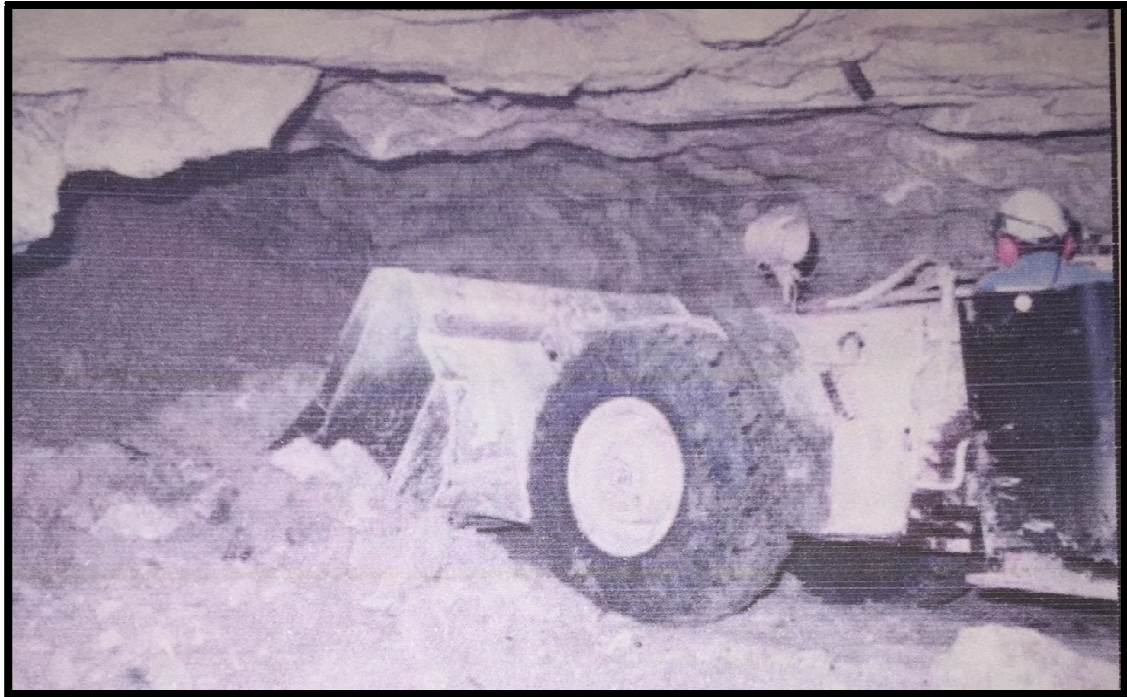


Fig. 57 : Remblaiement direct par le fond avec des engins mécaniques

5. Piliers maçonnés :

La technique traditionnelle d'édification de pilier artificiel est celle du pilier maçonné exécuté en hourdis au mortier de ciment (fig.....pieux dans gypses...). Cette technique est très employée pour la consolidation des cavités karstiques dont le recouvrement a été jugé apte ,sur le plan géotechnique. Les piliers maçonnés , exécutés sous celle-ci , dans toute la hauteur de la cavité , doivent reposer sur le bon sol.

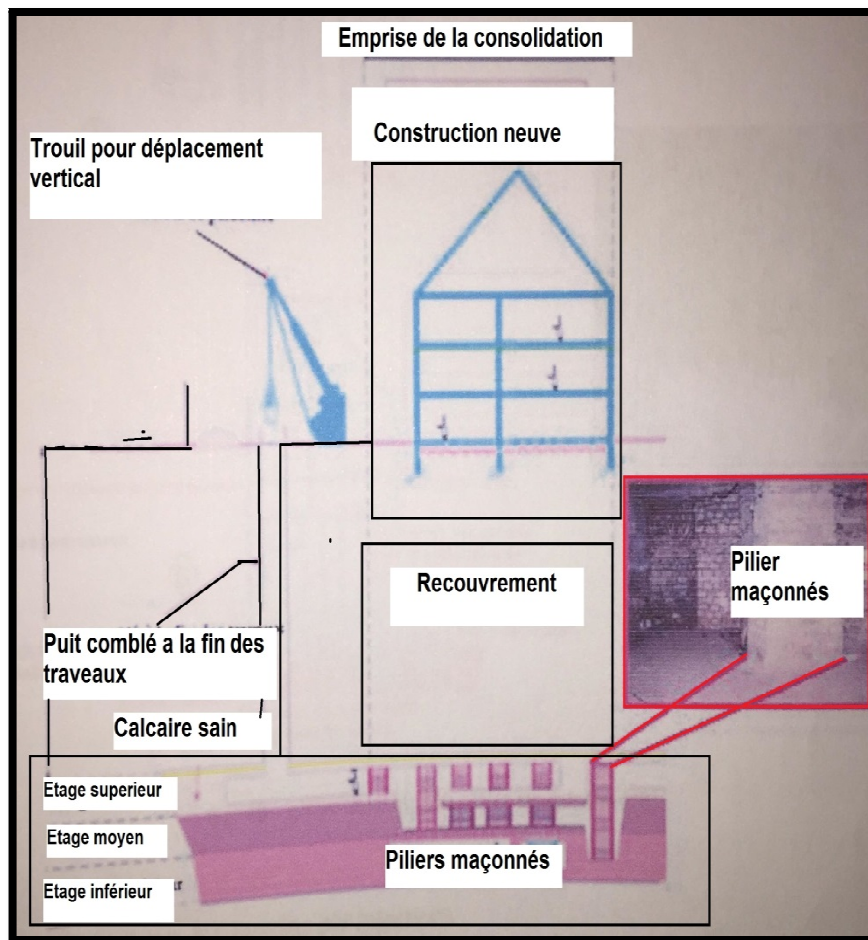


Fig.58 : Consolidation par piliers maçonnés sous un bâtiment neuf .

6. Pieux réalisés par forage ou battage :

Le principe est de rendre la construction suffisamment rigide pour qu'en cas d'affaissement localisé de la surface , elle ne présente que des mouvements d'ensemble . On distingue 2 types de fondations profondes :

7. Les puits bétonnés réalisés manuellement :

la traversée des cavités se fait en ceinturant le puits par un anneau maçonné qui a pour effet d'en stabiliser le toit ;

8. Les pieux réalisés mécaniquement .

La traversée des cavités se fait , soit en injectant préalablement du béton en réalisant un cheminage. Les puits et pieux sont de diamètre suffisant pour éviter les risques .la base doit reposer sur une assise saine.

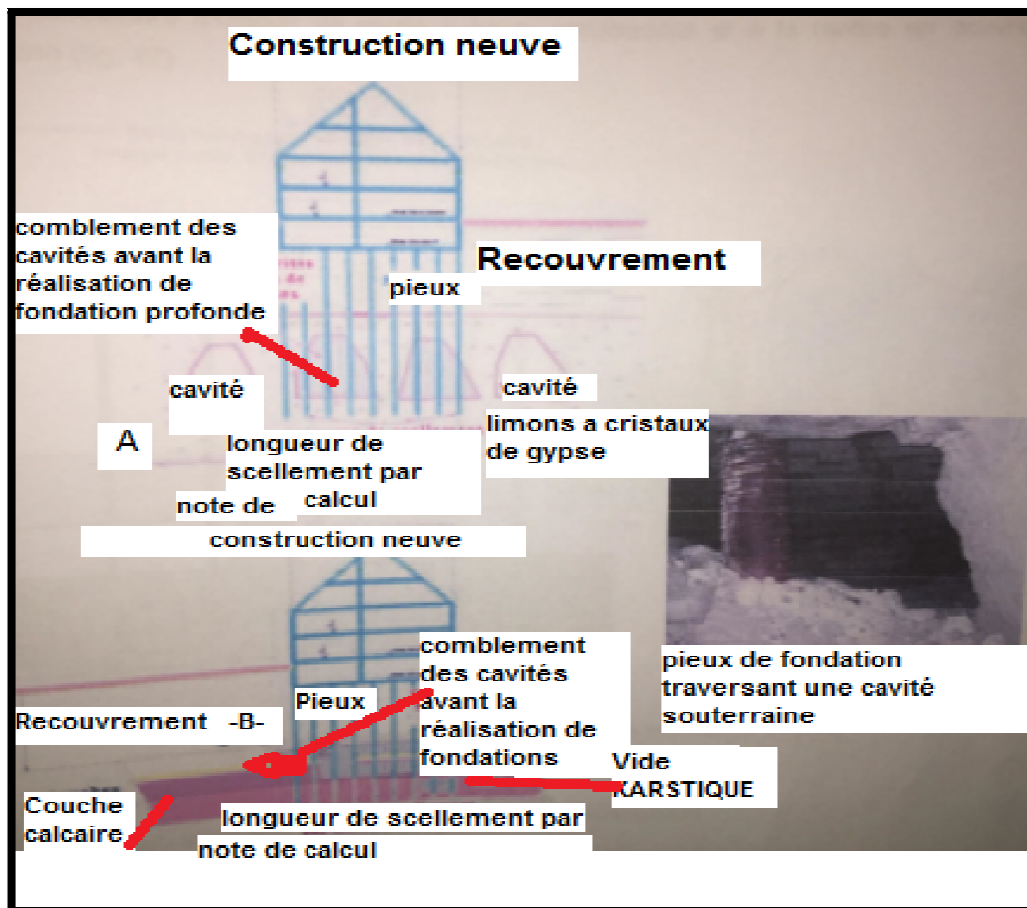


Fig. 59 : Pieux dans gypses (A) et les calcaires (B)

9. Traitement des terrains par injections :

Les opérations d'injections de mortier ou de coulis représentent le mode de traitement le plus accompli en assurant une consolidation efficace et définitive du sous-sol par restitution de propriétés de résistance suffisantes. Le traitement par injections est réservé aux sites difficiles qui nécessitent un niveau de sécurité maximal et plus spécifiquement dédiées au traitement des terrains en site urbains destinés a recevoir

des constructions nouvelles (projet d'aménagement d'une zone pavillonnaire ou d'immeubles collectifs). Le procédé de comblement par injections se différencie essentiellement des autres modes de comblement par la mise en œuvre de granulats fins de qualité toujours traités au ciment , mélangés a de l'eau et injectés sous forme d'émulsion . Dans le cas de vides de relativement faible volume , il est nécessaire d'utiliser un coulis a haute pénétrabilité et a le mettre en œuvre sous pression (Fig. 68).

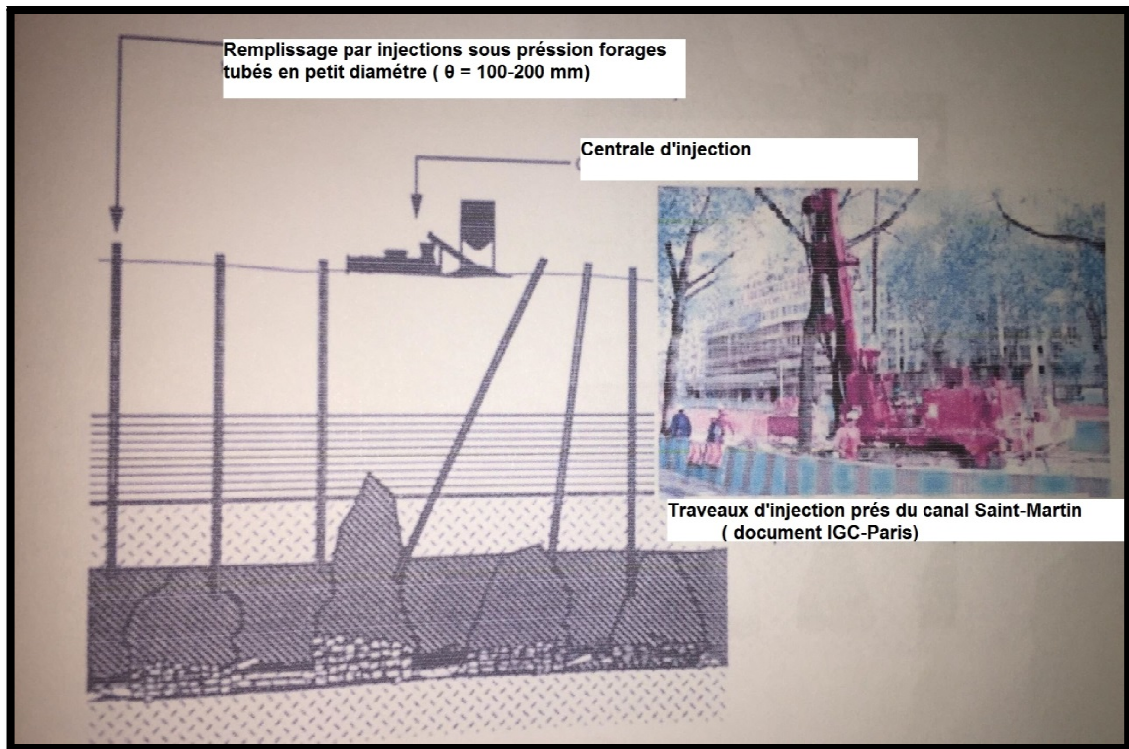


Fig. 60 : Injections de mortier ou de coulis sous faible pression.

10. Suppression des vides par comblement – terrassement :

Les techniques de suppression des vides consistent a supprimer les vides souterrains par abattage (mécanisé ou par explosif) des terrains de couverture . Cette méthode étant destructrices et par conséquent non utilisable directement en site urbanisé.

11. La méthode a un double objectif :

- **Opérer un comblement** direct des cavités sous-jacentes a partir des matériaux de recouvrement abattus par voie mécanique (Fig.48)
- **Remblaiement et compactage**, effectué après mise a jour des cavités par décaissement mécanisé. Les remblais correspondent aux matériaux de la couverture enlevés par les engins.
- **La méthode de remblaiement** étant généralement suivie d'un compactage destiné a minimiser les tassements différés des remblais , les terrains peuvent être réhabilités comme espaces verts . S'ils sont destinés a supporter des constructions nouvelles, les terrains doivent faire l'objet d'une consolidation par injections.

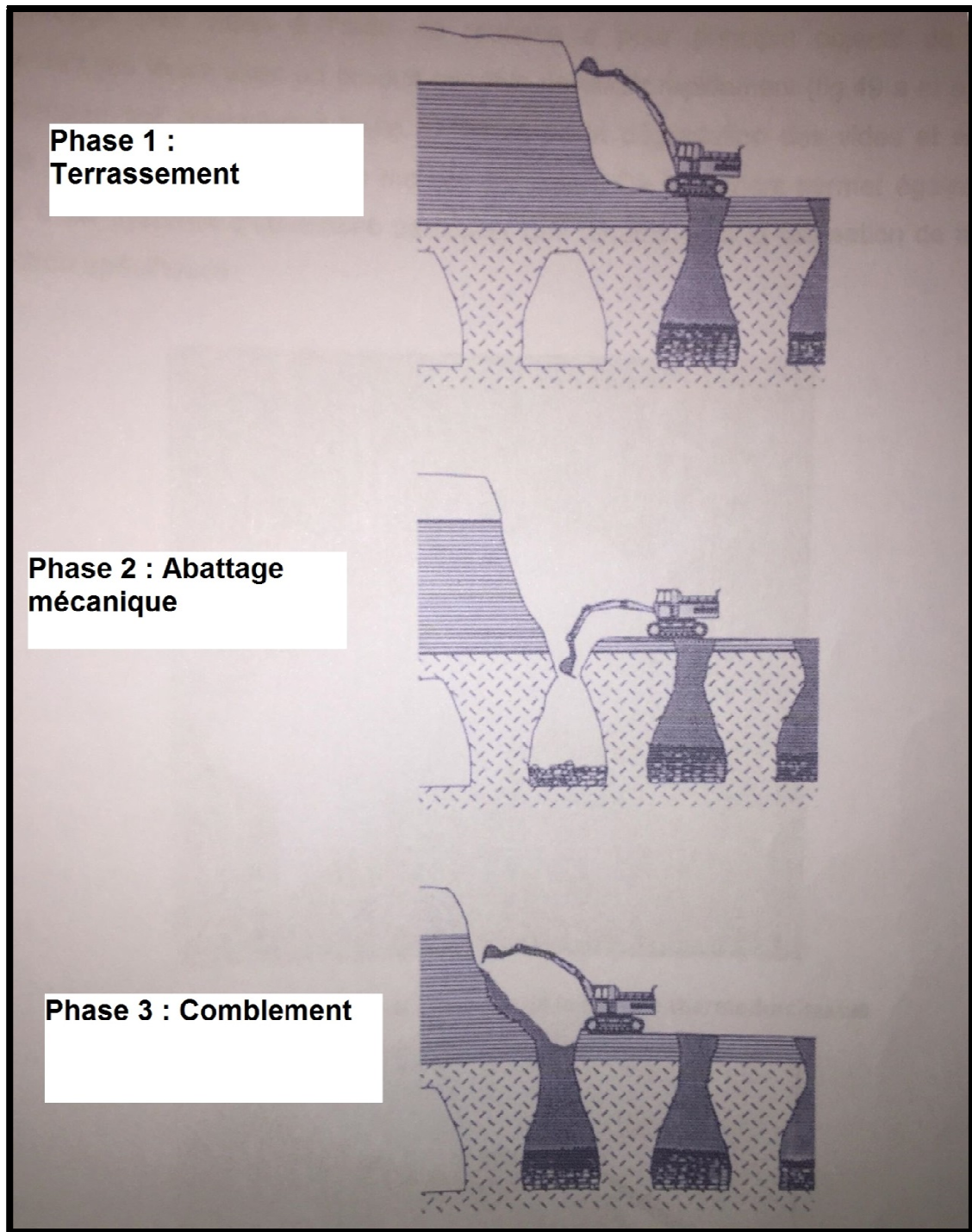


Fig. 61 : Suppression des vides par la méthode Terrassement- Comblement

• Remplissage par mousses thermodurcissables

Technique essentiellement utilisée là où les méthodes traditionnelles de comblement trouvent leurs limites, pour des raisons de mise en œuvre ou de sécurité, son application est réservée aux cavités d'assez faible volume. Il s'agit d'une technique récente et innovante sur laquelle le retour d'expérience livre des premières connaissances intéressantes sur plusieurs sites, mais qui demeurent encore limitées dans le temps (recul d'une dizaine d'années). La pérennité de la technique n'est donc pas encore acquise.

Le remplissage des vides à l'aide de mousse a pour principal objectif de combler complètement les vides avec un produit capable de durcir rapidement (Fig....49 a et b). Le but du remplissage est d'empêcher toute évolution de la dégradation des vides et éviter les chutes de toit ou la création d'une montée de voûte. Ce traitement permet également de participer à un système d'étanchéité particulier des terrains ou à la réalisation de barrages de protection spécifiques.



Fig. 62 a : Remplissage d'un fontis par de la mousse thermodurcissable

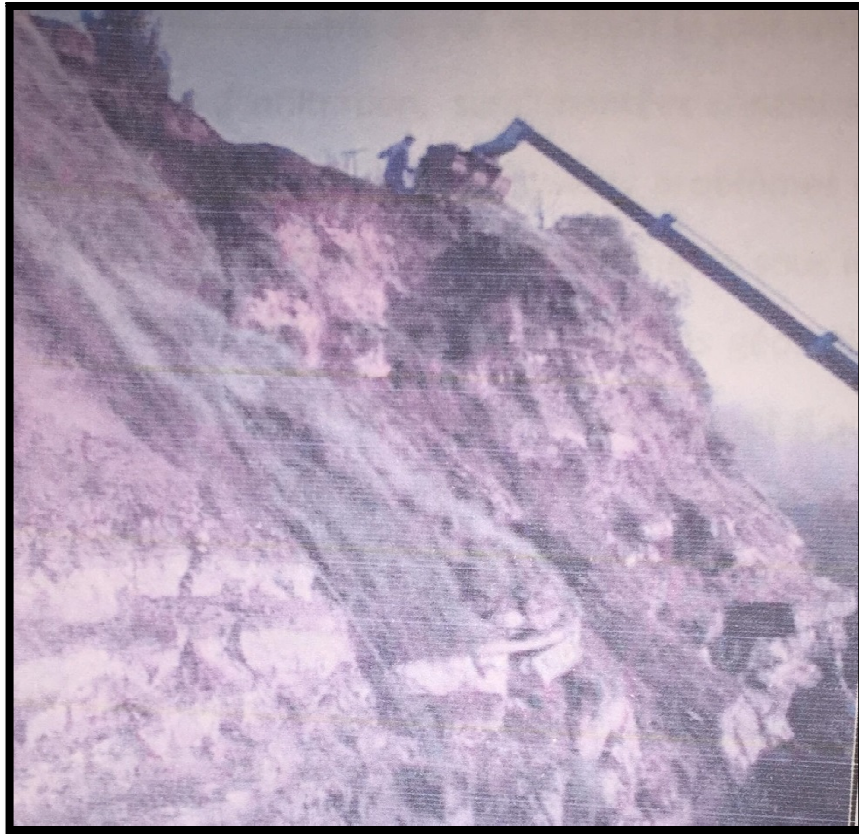


Fig. 62b : Mise en place d'une couverture végétale (Conflans Ste-Honorine ,val-d'Oise)

Conclusion :

La région d'Oran, de par sa complexité morfo structurale et son activité sismo-tectonique , présente des risques géologiques liés a la nature de ses terrains qui menace l'instabilité du site urbain .

Le climat de la région a une influence directe sur le niveau piézométrique et par conséquent sur la direction de l'écoulement souterrain qui est un facteur déclencheur des glissements et des affaissements.

Les écoulements superficiels et les infiltrations peuvent provoquer des risques potentiels d'effondrement, particulièrement ceux de la région étudié El kerma – et es sein . Dans ce cadre, il y a lieu de distinguer deux catégories de risques qui ont un impact sur les affaissements signalés au niveau du site étudié :

_ Risques anthropique et les risques liés aux phénomènes de dissolution des formations géologiques affectant d'une part les calcaires gréseux, développant une structure karstique et d'autre part des lentilles de gypse incrustés dans les formations limoneuses.

Ensuite on a vu le Géoradar qui a une utilisation simple et peut être utilisé dans les sites fortement urbanisés

Cependant l'interprétation des signaux peut se révéler difficile malgré les filtrages appliqués, et les terrains en surface peuvent s'ils sont conducteurs masquer les couches plus profondes. En plus, la profondeur réduite de cette méthode limite son utilisation aux anomalies superficielles.

L'Imagerie électrique peut pallier à ce handicap de profondeur et cette méthode peut se révéler plus puissante malgré son coût plus élevé.

Au final de ce travail on a vu par la suite le traitement et moyens de remédiations de ces cavités en reposant sur des méthodes de traitement par remplissage des vides qui représentent des solutions de traitement des cavités souterraines instables.

Références Bibliographiques

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

BENABDESSLE M (2013) : Les inondations qui constituent un danger permanent dans la ville d'Es Sénia. Mémoire de master. Univ Oran 68 pp , 2. 3 fig 11

BAGHDADI M. (2018) : Le phénomène des formations géologiques et leur impact sur les risques urbains de la région d'Oran. Réflexion sur les moyens de remédiation ,thèse Master Univ. Oran2 , 65pp -57 fig 60

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

EL KHEMMARI K .et al (2007) : Imagerie combine géo-électrique-radar des cavités souterraines de ZaouitEch Cheikh (Maroc) C.R. Géoscience 339,460-467.

GOURINARD Y (1958) : Recherches sur la géologie du littoral Oranais ,Epirogénèse et nivellement service de la carte géologique de l'Algérie . Bull . n° 6 , 111 p.

Laboratoire des travaux publique d'Oran (LTPO) , construction d'un nouveau parking (AEROPORT AHMED BEN BELLA) ,Oran 201

MAHAMMED D ,Mansour H , Benzerguin A . (2010) : Utilisation de la géo électrique 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.

TABTI MALIKA ET BOUAMEUR IMENE ,impacte du risque géologique en zone urbaine cas de l'affaissement du bâti au niveau du ravin blanc(Oran) . Mémoire de master .univ Oran 2 , 50 pages , 43 fig 20 (2017).