



الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية
République algérienne démocratique et populaire
وزارة التعليم العالي والبحث العلمي
Ministère de l'enseignement supérieur et de la recherche scientifique
جامعة العربي التبسي - تبسة
Université Larbi Tebessi - Tébessa
معهد المناجم
Institut des mines
قسم المناجم والجيوتكنولوجيا
Département des mines et de la géotechnologie



MEMOIRE

Présenté en vue de l'obtention d'un diplôme de Master académique

Filière : Génie minier

Option : Géotechnique.

Etude et détection des cavités souterraines par le géoradar dans la région de Constantine

Présenté et soutenu par

- HADJI Ayyoub Abdenacer.
- LAOUAR Abdelmalek.

Devant le jury:

		Grade	Etablissement
Président :	MEBROUK Faouzi	MAA	Université Larbi Tebessi - Tébessa
Encadreur :	Dr BERRAH Yacine	MCB	Université Larbi Tebessi - Tébessa
Co-encadreur	BRAHMI Serhane	MAA	Université Larbi Tebessi - Tébessa
Examineur :	HAMDANE Ali	MAA	Université Larbi Tebessi - Tébessa

Promotion 2019-2020

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية
وزارة التعليم العالي والبحث العلمي

مؤسسة التعليم العالي : جامعة العربي التبسي - تبسة

تصريح شرفي
خاص بالالتزام بقواعد النزاهة العلمية لانجاز بحث

أنا الممضي أدناه،

السيد (ة) العور عبد الملاك الصفة : طالب، أستاذ باحث، باحث دائم : طالب

الحامل لبطاقة التعريف الوطنية رقم : 2006.14249 و الصادرة بتاريخ 2016/10/24

المسجل بمعهد المناجيم قسم المناجم و جيوتكنولوجيا
و المكلف بانجاز أعمال بحث (مذكرة التخرج، مذكرة ماستر، مذكرة ماجستير، أطروحة دكتوراه)، عنوانها :

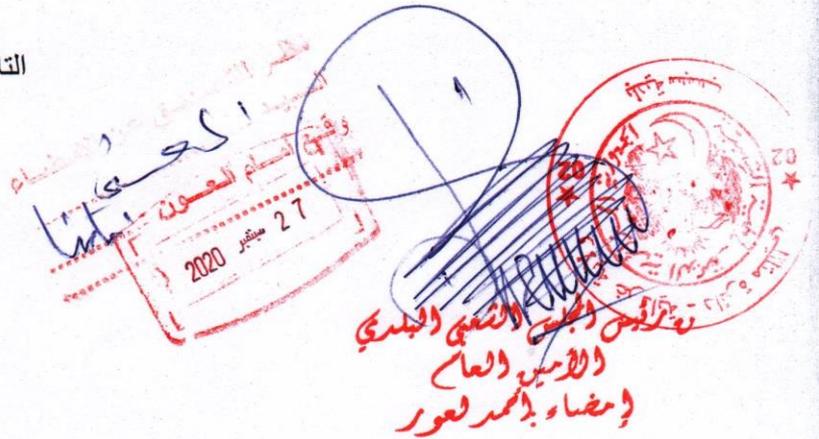
..... Etude et détection de cavités souterraines
..... Par GéORADAR dans la région de Constantine

أصرح بشرفي أنني ألتزم بمراعاة المعايير العلمية و المنهجية و معايير الأخلاقيات المهنية و النزاهة الأكاديمية
المطلوبة في انجاز البحث المذكور أعلاه.

التاريخ:

إمضاء المعني (ة)





الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية
وزارة التعليم العالي والبحث العلمي

مؤسسة التعليم العالي : جامعة العربي التبسي - تبسة

تصريح شرفي
خاص بالالتزام بقواعد النزاهة العلمية لانجاز بحث

أنا الممضي أدناه،

السيد: **حاجي ايوب عبد الناصر**. الصفة : طالب، أستاذ باحث، باحث دائم : طالب

الحامل لبطاقة التعريف الوطنية رقم : 111090449. و الصادرة بتاريخ : 16.10.2018

المسجل بمعهد : **المناجم تبسة**. قسم : **المناجم والجيوتكنولوجيا**

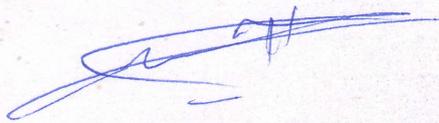
و المكلف بانجاز أعمال بحث (مذكرة التخرج، مذكرة ماستر، مذكرة ماجستير، أطروحة دكتوراه)، عنوانها :

Etude et détection des cavités par géoradar dans la région de Constantine

أصرح بشرفي أنني ألتزم بمراعاة المعايير العلمية و المنهجية و معايير الأخلاقيات المهنية و النزاهة الأكاديمية المطلوبة في انجاز البحث المذكور أعلاه.

التاريخ:.....

إمضاء المعني (ة)



جامعة مسيلدي غيلان
تتمتع بمصداقية على أعضاء الهيئة
حاجي ايوب عبد الناصر
111090449
الصادرة
من شرفي
سيدتي غيلان
2018.01.16
سيدتي غيلان

29 مشير 2020

عن رئيس المجلس الشعبي البلدي وبتفويض من
رئيسة مصلحة تنظيم الشؤون العامة
والتشبيط الإجتماعي و الثقافي
عبد حفصة ميسية



الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية

وزارة التعليم العالي والبحث العلمي

جامعة العربي التبسي - تبسة

مقرر رقم 260 المؤرخ في 21/05/2020 يتضمن تعيين لجنة مناقشة مذكرة ماستر.

إن مدير جامعة العربي التبسي - تبسة،

- بمقتضى القرار الوزاري رقم 351 المؤرخ في 29 أوت 2019 والمتضمن تعيين السيد بودلاعة عمار

مديرا بالنيابة لجامعة العربي التبسي - تبسة،

- وبمقتضى المرسوم التنفيذي رقم: 12-363 المؤرخ في 8 أكتوبر 2012، المعدل والمتمم للمرسوم التنفيذي

رقم 08-09 المروج في: 04 جانفي 2009 والمتضمن إنشاء جامعة العربي التبسي - تبسة،

- وبمقتضى المرسوم التنفيذي رقم 08-265 المؤرخ في 17 شعبان عام 1429 الموافق 19 غشت سنة 2008

الذي يحدد نظام الدراسات للحصول على شهادة الليسانس وشهادة الماستر وشهادة الدكتوراه، لاسيما المادة 9 منه،

- وبموجب القرار رقم 362 المؤرخ في 09 جوان 2014 الذي يحدد كفاءات إعداد ومناقشة مذكرة الماستر،

لاسيما المادتان 10 و 11 منه،

- وبموجب القرار رقم 1080 المؤرخ في 13 أكتوبر 2015 والمتضمن تأهيل جامعة العربي التبسي - تبسة

لضمان التكوين لنيل شهادة الماستر تخصص جيوتقني بعنوان السنة الجامعية 2019 / 2020،

- وبعد الاطلاع على محضر المجلس العلمي لمعهد المناجم المؤرخ في 20/05/2020،

يقرر ما يأتي:

المادة الأولى: تُعيّن بموجب هذا المقرر لجنة مناقشة مذكرة الماستر المحضرة من طرف الطالب (ة):

لعور عبد المالك، المولود (ة) بتاريخ 1984/06/08 ب سببب - غرداية، والموسومة ب

Etude et détection des cavités souterraines par le Géoradar dans la région de Constantine

والمسجل (ة) بمعهد المناجم

المادة 2: تتشكل اللجنة المشار إليها في المادة الأولى من الأعضاء الآتي ذكرهم:

رقم	الاسم واللقب	الرتبة	مؤسسة الانتماء	الصفة
1	فوزي مبروك	أستاذة مساعدة - أ	جامعة العربي التبسي - تبسة	رئيسا
2	ياسين براح	أستاذ محاضر - ب	جامعة العربي التبسي - تبسة	مشرفا
3	سرحان براهمي	أستاذ مساعد - أ	جامعة العربي التبسي - تبسة	مساعد مشرفا
4	علي حمدان	أستاذ مساعد - أ	جامعة العربي التبسي - تبسة	ممتحنة

المادة 3: يكلف رئيس قسم المناجم والجيوتكنولوجيا بتنفيذ هذا المقرر الذي يُسلم نسخة عنه إلى كل من الطالب

المعني والمشرف على المذكرة وأعضاء لجنة المناقشة فور توقيعه.

المادة 4: تحفظ نسخة عن هذا المقرر في الملف البيداغوجي للطالب المعني، وينشر في النشرة الرسمية

لجامعة العربي التبسي - تبسة.

حرر بتبسة، في: 21/05/2020

عن المدير، وبتفويض منه

مدير المعهد

مدير معهد المناجم بالنيابة
د. عبد الحميد لايبسر



الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية

وزارة التعليم العالي والبحث العلمي

جامعة العربي التبسي - تبسة

مقرّر رقم 61/ مؤرخ في 21/05/2020 يتضمن تعيين لجنة مناقشة مذكرة ماستر.

إن مدير جامعة العربي التبسي - تبسة،

- بمقتضى القرار الوزاري رقم 351 المؤرخ في 29 أوت 2019 والمتضمن تعيين السيد بودلاعة عمار مديرا بالنيابة لجامعة العربي التبسي - تبسة،

- وبمقتضى المرسوم التنفيذي رقم: 12-363 المؤرخ في 8 أكتوبر 2012، المعدل والمتمم للمرسوم التنفيذي رقم 08-09 المرّوج في: 04 جانفي 2009 والمتضمن إنشاء جامعة العربي التبسي - تبسة،

- وبمقتضى المرسوم التنفيذي رقم 08-265 المؤرخ في 17 شعبان عام 1429 الموافق 19 غشت سنة 2008 الذي يحدّد نظام الدراسات للحصول على شهادة الليسانس وشهادة الماستر وشهادة الدكتوراه، لاسيما المادة 9 منه،

- وبموجب القرار رقم 362 المؤرخ في 09 جوان 2014 الذي يحدّد كفايات إعداد ومناقشة مذكرة الماستر، لاسيما المادتان 10 و 11 منه،

- وبموجب القرار رقم 1080 المؤرخ في 13 أكتوبر 2015 والمتضمن تأهيل جامعة العربي التبسي - تبسة لضمان التكوين لنيل شهادة الماستر تخصص جيوتقني بعنوان السنة الجامعية 2019 / 2020،

- وببعد الاطلاع على محضر المجلس العلمي لمعهد المناجم المؤرخ في 20/05/2020،

يقرّر ما يأتي:

المادة الأولى: تُعيّن بموجب هذا المقرّر لجنة مناقشة مذكرة الماستر المحضّرة من طرف الطالب (ة):

حاجي أيوب عبد الناصر، المولود (ة) بتاريخ 18/06/1996 ب سيدي غيلاس - تيبازة، والموسومة ب

Etude et détection des cavités souterraines par le Géoradar dans la région de Constantine

والمسجّل (ة) بمعهد المناجم

المادة 2: تتشكّل اللجنة المشار إليها في المادة الأولى من الأعضاء الآتي ذكرهم:

رقم	الاسم واللقب	الرتبة	مؤسسة الانتماء	الصفة
1	فوزي مبروك	أستاذة مساعدة - أ	جامعة العربي التبسي - تبسة	رئيسا
2	ياسين براح	أستاذ محاضر - ب	جامعة العربي التبسي - تبسة	مشرفا
3	سرحان براهيم	أستاذ مساعد - أ	جامعة العربي التبسي - تبسة	مساعد مشرفا
4	علي حمدان	أستاذ مساعد - أ	جامعة العربي التبسي - تبسة	ممتحنة

المادة 3: يكلف رئيس قسم المناجم والجيوتكنولوجيا بتنفيذ هذا المقرّر الذي يُسلم نسخة عنه إلى كلّ من الطالب المعني والمشرّف على المذكرة وأعضاء لجنة المناقشة فور توقيعه.

المادة 4: تحفظ نسخة عن هذا المقرّر في الملفّ البيداغوجي للطالب المعني، وينشر في النشرة الرسمية لجامعة العربي التبسي - تبسة.

حرّر بتبسة، في: 21/05/2020

عن المدير، وبتفويض منه

مدير المعهد

مدير معهد المناجم بالنيابة
د. عولم ساراييسر



الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية

وزارة التعليم العالي والبحث العلمي

جامعة العربي التبسي - تبسة

مقرر رقم 260 المؤرخ في 21/05/2020 يتضمن الترخيص بمناقشة مذكرة ماستر.

إن مدير جامعة العربي التبسي - تبسة،

- بمقتضى القرار الوزاري رقم 351 المؤرخ في 29 أوت 2019 والمتضمن تعيين السيد بودلاعة عمار

مديرا بالنيابة لجامعة العربي التبسي - تبسة،

- وبمقتضى المرسوم التنفيذي رقم: 12-363 المؤرخ في 8 أكتوبر 2012، المعدل والمتمم للمرسوم التنفيذي

رقم 08-09 المروج في: 04 جانفي 2009 والمتضمن إنشاء جامعة العربي التبسي - تبسة،

- وبمقتضى المرسوم التنفيذي رقم 08-265 المؤرخ في 17 شعبان عام 1429 الموافق 19 غشت سنة 2008 الذي

يحدّد نظام الدراسات للحصول على شهادة الليسانس وشهادة الماستر وشهادة الدكتوراه، لاسيما المادة 9 منه،

- وبموجب القرار رقم 362 المؤرخ في 09 جوان 2014 الذي يحدّد كفايات إعداد ومناقشة مذكرة الماستر، لاسيما

المادة 7 منه،

- وبموجب القرار رقم 1080 المؤرخ في 13 أكتوبر 2015 والمتضمن تأهيل جامعة العربي التبسي - تبسة

لضمان التكوين لنيل شهادة الماستر تخصص جيوتقني بعنوان السنة الجامعية 2019 / 2020،

- وبموجب المقرر رقم 260 المؤرخ في 21/05/2020 والمتضمن تعيين لجنة مناقشة مذكرة الماستر،

- وبعد الاطلاع على تقرير لجنة المناقشة المؤرخ في

يقرر ما يأتي:

المادة الأولى: يُرخصُ للطالب الطالب (ة) لعور عبد المالك، المولود (ة) بتاريخ 1984/06/08 ب سبب -

غرداية، بمناقشة مذكرة الماستر والموسومة ب

Etude et détection des cavités souterraines par le Géoradar dans la région de Constantine

المادة 2: يكلف رئيس قسم المناجم والجيوتكنولوجيا بتنفيذ هذا المقرر الذي يسلم نسخة عنه إلى الطالب

المعني بالمناقشة وأعضاء لجنة المناقشة فور توقيعه، وبضمان نشره عبر فضاءات المؤسسة المادية والرقمية.

المادة 3: تُحفظ نسخة عن هذا المقرر ضمن الملف البيداغوجي للطالب المعني وينشر في النشرة الرسمية

لجامعة العربي التبسي - تبسة.

حرر بتبسة، في: 21/05/2020

عن المدير، ويتفويض منه

مدير المعهد



مدير معهد المناجم بالنيابة

عولمي زويبر

Année universitaire : 2019-2020

Tébessa le :

Lettre de soutenabilité

Noms et prénoms des étudiants :

- 1 **HADJI Ayyoub Abdenacer.**
- 2 **LAOUAR Abdelmalek.**

Niveau : **MASTER 2**

Option : **GEOTECHNIQUE**

Thème : **Etude et détection des cavités souterraines par le géoradar dans la région de Constantine.**

Nom et prénom de l'encadreur : **Dr BERRAH Yacine**

Chapitres réalisés	Signature de l'encadreur
Situation géographique et étude géologie.	
Hydro climatologie.	
Etude géotechnique et reconnaissance de sol.	
Présentation de GPR	
Cas d'étude et réalisation de la méthode GPR.	

DÉDICACE

Je dédie ce modeste travail :

*À ma mère qui a sacrifiée sa jeunesse pour mon auspice, Que
Dieu les garde.*

À mon cher père.

A mes frères.

À mes sœurs.

A tous mes chers amis, sans exception

*A tous ceux qui de loin ou de près n'ont cessé de m'apporter
Leur soutien pendant mes années d'étude.*

*A tous mes collègues de la promotion de génie des mines.
2015-2016.*

Ayyoub abdenacer et Abdelmalek

Remerciements

Surtout, nous remercions et nous exprimons notre gratitude à **Allah**,
Qui nous a donné la patience et la volonté de continuer ce travail.

Nous exprimons nos profondes gratitudees à nos parents pour leurs
Encouragements, leur soutien et pour les sacrifices Qu'ils ont enduré.

Nous tenons à remercier Notre encadreurs **Mr : Dr BERRAH Yacine** et
BRAHMI Serhane pour son acceptation de dirigé a mon travail et son précieux
conseil et son aide durant toute la période du travail.

nos vifs remerciements vont également aux membres du jury pour l'intérêt
qu'ils ont porté à notre recherche en acceptant d'examiner notre travail et de
l'enrichir par leurs propositions.

Nous remercions tous les enseignants de département de Génie Minier et
spécialement les enseignants de GEOTECHNIQUE.

Enfin nous remercions tous ceux qui de près ou de loin ont participé à
l'élaboration de ce travail.

AYYOUB ABDENACER ET ABDELMALEK

Resume

Ce travail de mémoire présente la prospection et la réalisation de la recherche d'une cavité souterraine par la méthode de géoradar (GPR).

Le radar à pénétration du sol (GPR) est une méthode de prospection géophysiques les plus modernes et les plus largement utilisées pour localiser des cavités souterraines en raison de la vitesse d'exploration et des images à haute résolution. Pour définir des cavités souterraines dans un petit temps et un bon résultat de recherche on a utilisé GPR.

Mots clés : géoradar ; prospection ; résolution.

ملخص

تقدم هذه الأطروحة التنقيب وتحقيق البحث عن تجويف تحت الأرض بطريقة الرادار الجيولوجي الماسح.

هو وسيلة التنقيب الجيوفيزيائية الأكثر حداثة والأكثر استخدامًا لتحديد مواقع التجاويف (GPR) رادار اختراق الأرض تحت نظرًا لسرعة الاستكشاف والصور عالية الدقة. لتحديد التجاويف تحت الأرض في وقت قصير و نتائج بحث جيدة لذلك استخدمنا واخترنا الرادار الجيولوجي.

الكلمات المفتاحية. التنقيب. الرادار الجيولوجي. الدقة

ABSTRACT

This thesis presents the prospecting and the realization of the search for an underground cavity by the method of geology radar GPR.

Ground penetrating radar (GPR) is a most modern and widely used geophysical prospecting method for locating underground cavities due to the speed of exploration and high resolution images. To define underground cavities in a short time and good research results we used GPR,

Key Word : prospecting ; geology radar ; resolution.

SOMMAIRE

Resume	I
Liste Des Figures.....	II
Liste des tableaux	III
NOTATIONS ET SYMBOLES	IV
INTRODUCTION GENERAL :	1
Chapitre 1 : Situation géographique et étude géologie	1
I.1 Cadre Géographique :	3
I.1.1 Situation géographique :	3
I.2 Géologie Régionale.....	5
I.2.1 Domaine interne :	5
I.2.1.1 Socle Kabyle :	6
I.2.1.2 - Un ensemble supérieur :	6
I.2.1.3 - Un ensemble inférieur.....	6
I.2.1.4 Dorsale Kabyle (chaîne calcaire) :	6
I.2.2 Domaine des flyschs :	6
I.2.2.1 Flysch mauritanien:	7
I.2.2.2 Le flysch massylien:	7
I.2.2.3 Le flysch numidien:.....	7
I.2.3 Domaine externe.....	7
I.2.3.1 Les séries Telliennes.....	7
I.2.3.1.1 Les unités ultra-telliennes :	8
I.2.3.1.2 Les unités telliennes sensu stricto :	8
I.2.3.1.3 Les unités pénitelliennes et les unités méridionales à nummulites :	8
I.2.3.2 Les séries de l'avant pays.	8
I.2.3.2.1 Unité néritique Constantinoise :	8
I.2.3.2.2 Unités des écaillés des Sellaoua :	9
I.2.3.2.3 Unités sud-sétifiennes :	9
I.2.3.2.4 Le para autochtone Nord-aurésien :	9
I.2.3.2.5 L'autochtone Nord-jaurésien :	9
I.3 Les Différentes Phases Tectoniques :	9
I.3.1 Les événements tectoniques durant le Mésozoïque	9
I.3.1.1 Au Trias.....	9

I.3.1.2	Au Lias :.....	10
I.3.1.3	Au jurassique moyen et supérieur :	10
I.3.1.4	Au Crétacé inférieur	10
I.3.1.5	Au Crétacé supérieur.....	10
I.3.2	Les événements tectoniques durant le Tertiaire	11
I.3.2.1	A l’Eocène :	11
I.3.2.2	Au Miocène	11
I.3.2.2.1	Phase compressive du Burdigalien.....	11
I.3.2.2.2	Phase tangentielle tortonienne -phase alpine	12
I.3.3	La Tectonique récente :	12
I.4	Litho-Stratigraphie de la région de Constantine	12
I.4.1	Trias	12
I.4.2	La nappe néritique constantinoise.....	13
I.4.2.1	Jurassique supérieur.....	13
I.4.2.2	Le Néocomien.....	13
I.4.2.3	Le Barrémien	13
I.4.2.4	L’Aptien.....	13
I.4.2.5	L’Albien et le Vraconien.....	14
I.4.2.6	Le Cénomaniens	14
I.4.2.7	Le Turonien.....	14
I.4.2.8	Le Sénonien transgressif.....	14
I.4.3	Les nappes telliennes	14
I.4.3.1	La nappe ultra-tellienne	14
I.4.3.2	Les nappes telliennes sensu-stricto.....	14
I.4.3.3	La nappe péni-tellienne et unités méridionales à nummulites.....	15
I.4.4	La nappe numidienne ou flysch numidien	15
I.4.5	Les séries post-nappes.	16
I.4.5.1	Le Mio-Pliocène continental.....	16
I.4.5.2	Le Quaternaire.....	16
I.5	Conclusion:	16
Chapitre 2 : Hydro climatologie.....		2
I.6	Introduction :.....	18
I.7	Les paramètres de climat :	18
I.7.1	Les précipitations et les températures :	18
I.7.1.1	Evolution annuelle des précipitations :	19

I.7.1.2	Précipitations Mensuelles.	19
I.7.2	Evolution annuelle des températures :	20
I.7.3	. Evolution mensuelle interannuelle des températures :	21
I.7.4	Les indices climatiques :	21
I.7.4.1	Indice de Martonne (1925):	21
I.7.4.2	Climatogramme de Péguy :	22
I.7.5	Régime climatique :	23
I.7.5.1	Méthode d’Eu verte	23
I.7.5.2	Diagramme Ombrothermique De Gausсен :	24
I.8	Calcul de la lame d’eau Précipitée sur le sous bassin :	26
I.8.1	Moyenne Arithmétique :	26
I.8.2	Méthode des isohyètes :	26
I.9	Evapotranspiration :	27
I.9.1	Evapotranspiration Potentielle :	27
I.9.1.1	Formule de Thorntwaite.....	27
I.9.1.2	Formule simplifiée de Serra :	27
I.9.1.3	Formule de l’ANRH (PENMAN) :	28
I.9.2	Calcul de l’evapotranspiration réelle (ETR) ou déficit d’écoulement :	29
I.9.2.1	Formule de TURC :	29
I.9.2.2	Méthode du Bilan Hydrique de THORNTWAITE.....	29
I.9.3	Estimation du bilan d’eau :	31
I.10	Ruissellement	31
I.10.1	Formule de FERZI, 1979 (en Tunisie).....	31
I.11	Infiltration :	32
I.12	Hydrologie :	32
I.13	Conclusion :	32
Chapitre 3	: Etude géotechnique et reconnaissance de sol.....	18
I.14	Introduction.....	34
I.15	Des objectifs essentiels à la qualité des études :	34
I.16	LES METHODES GEOPHYSIQUES.....	35
I.16.1	Définitions et domaines d'application méthodes géophysiques	35
I.16.1.1	Méthode de reconnaissance par résistivité électrique.....	35
I.16.1.1.1	Le sondage électrique	36
I.16.1.1.2	Le traîné de résistivité	37
I.16.1.2	Méthode de reconnaissance par sismique réfraction :	38

I.16.1.2.1	Principe de la reconnaissance :	38
I.16.1.2.2	Présentation des résultats.....	39
I.17	LES ESSAIS «IN SITU» ET LES SONDAGES.....	39
I.17.1	Pénétromètre dynamique :	39
I.17.2	Pénétromètre statique :	40
I.17.3	Pressiomètre :	40
I.17.4	L` Essai de Pénétration au carottier (Standard pénétration test).	41
I.18	LES ANALYSES ET LES ESSAIS EN LABORATOIRE.....	43
I.18.1	Essais d'identification :	43
I.18.1.1	Teneur en eau.....	43
I.18.1.2	Densité γ (Poids spécifique) :	44
I.18.1.3	Limite d'Atterberg (Norme NF P 94-051 et Norme NF P 94-052-1) :	44
I.18.1.4	L'analyse granulométrique par sédimentométrie :	50
I.18.1.5	Valeur au bleu du sol (Norme NF P 94 068) :	50
I.18.2	Essai mécanique :	52
I.18.2.1	Essai de cisaillement :	52
I.18.2.1.1	Essai de cisaillement CD consolidés drainés :	52
I.18.2.1.2	Essai de cisaillement CU consolidés non drainés :	53
I.18.2.1.3	Essai de cisaillement UU non consolidés non drainés :	53
I.18.3	Essai triaxial :	53
I.18.4	Essai de compression simple :	54
I.18.5	Essai oedometrique (Norme NF P 94-091) :	54
I.19	Conclusion :	56
Chapitre 4 : Présentation de la méthode GPR		34
I.20	Le radar de sol :	57
I.21	Le géo radar et la particularité du radar GPR à concevoir :	57
I.21.1	Propriétés électromagnétiques des sols :	57
I.21.1.1	Les équations de Maxwell :	57
I.21.1.2	Permittivité – ϵ :	58
I.21.1.3	Conductivité - σ :	60
I.21.1.4	Perméabilité magnétique - μ	61
I.21.1.5	Vitesse de propagation :	61
I.21.2	Base de fonctionnement et de prospection.....	62
I.21.3	Profondeur d'investigation du géoradar :	63
I.21.4	La résolution spatiale	64

I.21.5	Le choix de la fréquence nominale.....	65
I.22	Les différents modes d'acquisition.....	65
I.22.1	Le mode réflexion.....	65
I.22.2	Le mode transmission	66
I.23	Affichage et interprétation des données	67
I.24	Avantage:.....	70
I.25	Les domaines d'applications de la méthode radar sont multiples :.....	71
I.26	Exemple des résultats radar:.....	71
I.26.1	Codes de couleurs :	72
CHAPITRE 5:	Cas d'étude et réalisation de la méthode GPR.	58
I.27	Premier cas d études et sont résultant (le projet de réalisation logements):	75
I.27.1	Les Mesures effectuées :	75
I.27.2	Conclusion :	78
I.28	Deuxième cas d études géophysique au niveau du bloc 12-14 sur une superficie de 576m ² 79	
I.28.1	Mesures effectuées	79
I.28.2	RESULTATS DES MESURES.	80
I.28.3	Conclusion :	86
I.29	CONCLUSION GENERALE :	86
Références et Bibliographies.....		I

Liste Des Figures

Figure 1 : Situation géographique de la ville de Ali Mendjeli. 3

Figure 2: Capture d'une image par satellite..... 3

Figure 3: Les grands domaines d'origine alpine en méditerranée 5

Figure 4: Coupe géologique schématisant les relations structurales entre les différentes unités de la chaîne alpine d'Algérie orientale 8

Figure 5: Evolution annuelle des précipitations..... 19

Figure 6 : Précipitations mensuelle 20

Figure 7: Evolution des températures annuelles 21

Figure 8: Evolution mensuelle interannuelle des températures 21

Figure 9: Abaque de l'indice d'aridité annuel de Marton 1925 22

Figure 10: Climatogramme de PEGUY (Station de Constantine). 23

Figure 11: Diagramme Ombrothermique de la station de Constantine. 25

Figure 12: Carte des précipitations annuelles moyennes de l'Est algérien (1965-95). 26

Figure 13: Illustration du principe de mise en œuvre d'un sondage..... 36

Figure 14: Illustration du principe de mise en œuvre d'un profil..... 37

Figure 15 : méthode sismique réfraction..... 38

Figure 16: schéma de la pointe du pénétromètre à cône fixe et manchon de frottement 40

Figure 17 : schéma de l'essai Pressiomètre 41

Figure 18: Graphe essai SPT..... 42

Figure 19 : la pesée..... 43

Figure 20 : schéma de l'état de sol..... 45

Figure 21 : appairage de limite d'Atterberg..... 46

Figure 22 : réalisation de la limite de liquidité..... 46

Figure 23: Limite de liquidité..... 47

Figure 24: équivalente de sable..... 52

Figure 25: oedomètre. 55

Figure 26: courbe oedométrique. 56

Figure 27: Les différents types de polarisations et leur effet sur l'évolution de la partie réelle de la permittivité sur l'ensemble du spectre électromagnétique (modifié d'après Guéguen and Palciauskas, 1992). 59

Figure 28: Schéma de principe d'un Radar GPR basique..... 62

Figure 29: schéma de base éléments géo radar. 63

Figure 30: 'Skin depth' (en mètres) en fonction de la résistivité des matériaux géologiques (en Ohm.m) pour deux valeurs de permittivité relative du milieu : $\epsilon_r = 8$ (trait plein) et $\epsilon_r = 40$ (trait pointillé) (d'après Mc Cann ; 1988). 64

Figure 31: Résolution du géoradar en fonction de la fréquence (d'après Davis & Annan, 1989)..... 65

Figure 32 : Mise en œuvre des géoradars en mode « réflexion à offset constant » (E : émetteur R : récepteur) Les deux antennes, positionnées proches l'une de l'autre sont déplacées d'un même pas d'avancement sur la ligne de mesure. Le radar gramme est obtenu en juxtaposant les différents signaux ainsi enregistrés..... 66

Figure 33 : Mise en œuvre des georadars en mode « transmission » (E : émetteur,R : récepteur).....	67
Figure 34: Les affichages de numérisation: a) la conversion d'un affichage de tracé ondulé en un affichage de balayage couleur, b) un affichage de balayage en échelle de gris, c) un affichage de balayage d'intensité des couleurs.....	68
Figure 35: Le processus de construction d'un affichage tridimensionnel à partir d'une série de lignes bidimensionnelles: a) une série de lignes bidimensionnelles, et b) une vue de bloc tridimensionnelle.....	69
Figure 36 Dissection d'un bloc tridimensionnel en tranches.....	70
Figure 37: Vues de bloc et de sous-bloc pour se concentrer sur une région particulière à l'intérieur d'un bloc.....	70
Figure 38: Table de couleur des signaux radar	72
Figure 39: Antenne 200 MHz.....	74
Figure 40: Antenne 400 MHz montée sur chariot.....	74
Figure 41: Orientation des Profils.	75
Figure 42: Exemple de résultat GPR.....	76
Figure 43: Légende.....	76
Figure 44: Profil longitudinal	79
Figure 45: Profil Transversal.....	79
Figure 46 : Exemple de résultat.....	80
Figure 47 : légende.....	80

Liste des tableaux

Tableau 4 : donne une classification du climat.	24
Tableau 5: tableau de valeur des donnees de précipitation et de température de l'année 2019.	25
Tableau 7: Bilan d'eau selon Thornthwaite pour la station de CONSTANTINE.....	30
Tableau 8 : L'indice de plasticité	47
Tableau 9Analyse granulométrique et sédimentométrique (Norme NF P 94-057) :	48
Tableau 10Equivalent de sable (Norme NF EN 933-8) :	51
Tableau 11: Valeurs typiques à 100MHz de la permittivité relative, de la vitesse de propagation, de l'atténuation et de la conductivité pour des sols dans le domaine du radarGPR	62

NOTATIONS ET SYMBOLES

- B : est l'induction magnétique (Tesla),
 D : est la densité de flux électrique (C/m),
 J : représente la densité de courant (A/m²),
 δ : angle avec l'horizontale, : Enfoncement moyen par coup.
 ΔH : La variation ΔH de la hauteur
 σ' : La pression inter granulaire à chaque instant.
 γ_d : Poids spécifique du sol sec
 γ_h : Poids spécifique du sol humide
 $(\nabla) \vec{}$: désigne l'opérateur nabla,
 ΔP : palier de pression appliquée à la sonde.
 ΔV : augmentation de volume de la sonde.
 a : dépendant de la température
 A : section de la pointe
 C : ϕ , la résistance au cisaillement
 CD : Essai de cisaillement
 C_u : La cohésion
 Da : le déficit agricole
 e : L'indice des vides
 E : évapotranspiration potentielle annuelle moyenne en (m).
 $E \vec{}$: désigne le vecteur du champ électrique (V/m),
 e_o : l'indice des vides initiales
 ETP : évapotranspiration potentielle mensuelle en (mm)
 $ETPc$: évapotranspiration potentielle mensuelle corrigée (mm)
 Ex : l'excédent
 f : la fréquence du signal transmit au sol
 f_s : frottement latéral
 g : 9,81 m/s².
 H : hauteur de chute du mouton, : il représente la latitude en coordonnées Lambert
 $H \vec{}$: représente le vecteur du champ magnétique (A/m),
 I : L'infiltration en (mm) ;, : indice thermique obtenu par la formule, : II.2.1.1 Indice de Martonne (1925)
 I_c : Indice de consistance
 I_l : Indice de liquidité, : Indice de liquidité
 I_p : l'indice de plasticité
 K : constante liée à la géométrie de la sonde (homogène à un volume, : dimension d'une longueur et dépend de la géométrie du dispositif, : facteur de correction, : Coefficient correctif régional lu sur la carte iso-lignes variant entre 0.85 et 1.25
 K_m : Coefficient correctif mensuel compris entre 0.90 et 1.22.

la vitesse de propagation des ondes électromagnétiques dans le milieu traversée : la vitesse de propagation des ondes électromagnétiques dans le milieu traversée

L_r : lame ruisselée moyenne annuelle en mm.

m : moyenne des températures minimales du mois le plus froid

M : masse du mouton

M_s : la masse sèche de fines de sol utilisé pour l'essai

N : valeur caractérisant conventionnellement la résistance à la pénétration dans les terrains à prédominance sableuse dans les conditions, : nombre de stations utilisées.

NE : nord-est

N-S. : nord-sud

p : est la résistivité du terrain homogène

P : charge appliquée, : masse pointe + tiges, : II.3.1 Moyenne Arithmétique, : précipitation annuelle moyenne (mm).

P_f : la pression dite de fluage

P_i : la pluviométrie moyenne de chaque station

P_l : pression baptisée pression limite

Q : Quotient pluviothermique d'Emberger

q_c : la résistance de pointe

r : la résolution spatiale.

R : ruissellement en (m)

R_c : compression simple

RFU : Réserve en eau Facilement Utilisable

SE : L'équivalent de sable, Voir

SPT : Standard pénétration test

S_r : degré de saturation

T : : température annuelle moyenne

V_b : le volume total de bleu utilisé en ml

V_B : valeur au bleu

W : III.5.1.1 :Teneur en eau

W_L : Limite de liquidité

W_P : Limite de plasticité

W_R : Limite de retrait

ZF : • Zone Fracturée

α : indice dépendant de la température

ε : la constante diélectrique du milieu

λ : longueur d'ondes des ondes radar

μ : la perméabilité magnétique du milieu

ρ : désigne la densité de charge (C/m²),

ε : permittivité constante du matériau (F/m)

μ : la perméabilité constante du matériau (H/m),

σ : la conductivité constante du matériau (S/m)

Introduction générale :

INTRODUCTION GENERAL :

L'existence de cavités dans le sous-sol est une source potentielle de phénomènes dangereux d'un point de vue environnemental, industriel et constructions urbaines. Pour se rendre compte de l'importance de la caractérisation de ces trous avant leur effondrement. Il est bien connu que les caractéristiques du sous-sol d'un bâtiment jouent beaucoup sur sa résistance, notamment en cas de tremblement de terre. Des cavités d'origine naturelle (karstique ou effondrement), ou anthropique (galeries minières ou autres)

Le radar de sol, encore appelé Géo radar ou GPR (acronyme du nom anglais Ground Penetrating Radar) est une méthode d'investigation géophysique de sou sol. Il permet de sonder le sous-sol sur de grandes distances, rapidement, sans être obligé de creuser. C'est pourquoi il est très souvent utilisé dans des milieux urbains pour imager la structure du sous-sol est apparu au début du 20ème siècle. La première utilisation de ce système date de 1910 pour la localisation de cibles enfouies. Dans les années 70, le radar de sol a connu un essor fulgurant dans le domaine militaire surtout pour la détection de mines anti-personnel.

La pénétration des ondes est très proche-surface, entre 2 m et 50 m de profondeur environ. Celle-ci dépend de la fréquence de l'antenne utilisée, de la conductivité du sous-sol (plus un milieu est conducteur, moins la méthode sera efficace) et de la permittivité diélectrique du milieu.

Aujourd'hui, avec les avancées technologiques remarquables, les radars GPR se retrouvent dans plusieurs applications du génie civil et militaire. Ainsi le repérage de câbles enfouis ou de fissures dans les tunnels, la fouille de sites archéologiques, la mission d'exploration de la planète Mars, sont autant d'exemples d'applications qui nécessitent un radar à pénétration de sol.

La capacité de détection des cavités souterraines par la méthode GPR sont limité par la taille et la profondeur des cavités, et surtout par les propriétés physiques du milieu dans lequel se trouvent ces cavités. Chaque méthode géophysique possède ces limites de détection, différentes en fonction du ou des paramètres physiques concernés et des géométries d'acquisition utilisées. Le radar de sol est une méthode à mise en œuvre rapide, non destructive et utilisable facilement. Elle donne des informations très hautes résolution mais elle est limitée à des milieux peu conducteurs et des cibles peu profondes (dans les premiers 10 m). Les mesures gravimétriques sont sensibles aux dimensions, à la différence de densité et à la profondeur des cavités. Mais la détermination d'un modèle de sous-sol n'est pas toujours unique. Les mesures de résistivité électrique permettent de détecter des anomalies présentant de forts contrastes de résistivité par rapport au milieu ambiant mais avec des problèmes de résolution.

Il existe actuellement un besoin important de développement de nouvelles technologies Pour la détection des cavités.

Chapitre 1 : Situation géographique et étude géologie

I.1 Cadre Géographique :

Ali Mendjeli est une **ville nouvelle**, située dans la banlieue sud de **Constantine**. Son nom est un hommage au combattant de la guerre d'indépendance algérienne Ali Mendjeli.

I.1.1 Situation géographique :

La région d'étude est située au Nord-est Algérien, elle Appartient au Tell. Elle est limitée par les coordonnées géographiques suivantes : latitude : $36^{\circ}14'45''$ N, longitude : $6^{\circ}34'02''$ E. Elle s'étend sur une superficie relativement importante. Précisément à 267 Km des frontières Algériennes-tunisiennes, à 387 Km de la capitale Alger vers l'Ouest, à 124 Km de Skikda vers le Nord et à 249 Km de Biskra vers le Sud.

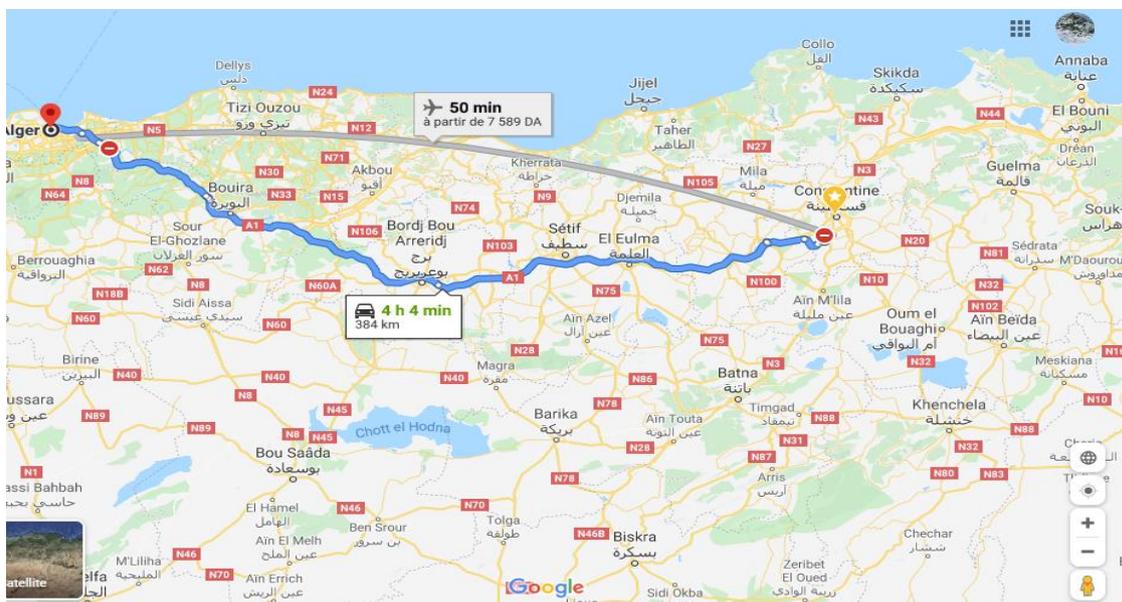


Figure 1 : Situation géographique de la ville de Ali Mendjeli.

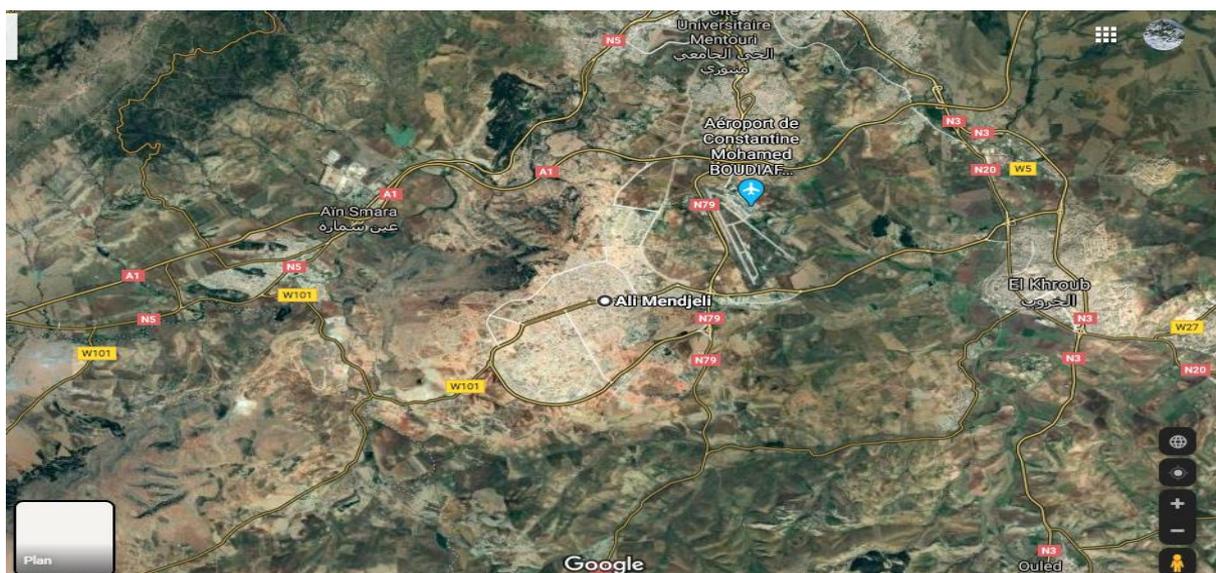


Figure 2: Capture d'une image par satellite.

Chapitre1 : Situation géographique et étude géologie

Constantine est limitée:

- Au nord par la wilaya de Skikda.
- A l'Est par la wilaya de Guelma.
- A l'ouest par la wilaya de Mila.
- Au sud par la wilaya d'Oum-El-Bouaghi.

I.2 Géologie Régionale

Le secteur d'étude (contient le Mole Constantinois) fait partie de la chaîne Alpine de l'Algérie Nord orientale. Cette dernière constitue un tronçon des chaînes plissées d'Afrique du nord, les Maghrébines, qui vont du Rif (Maroc) à la Sicile (Italie) en passant par l'Algérie et la Tunisie.

La chaîne des Maghrébines résulte probablement de la convergence et de la collision d'un Élément de la marge sud européenne avec la marge nord-africaine d'un bassin Téthysien

Le bassin Maghrébin s'est différencié en plusieurs domaines paléogéographiques qui sont Actuellement en partie superposés (Raoult J.F., 1974).

Les nappes où les structures constituant la chaîne des Maghrébides sont à vergence sud et sont issues de trois domaines paléogéographiques (D. DELGA 1989, J.M.VILA1980):

- **Domaine interne**
- **Domaine des flyschs**
- **Domaine externe.**

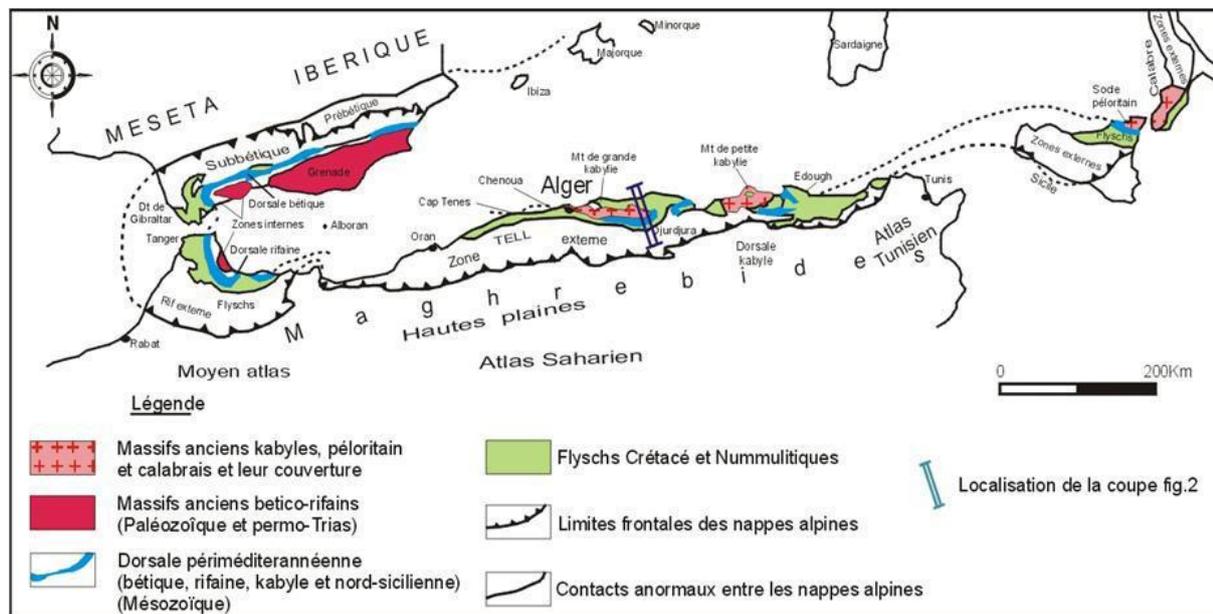


Figure 3: Les grands domaines d'origine alpine en méditerranée

Occidentale (Durand-Delga M.,1969).

I.2.1 Domaine interne :

- Le domaine interne. En Algérie orientale les zones internes n'apparaissent que dans les Kabyles. Elles sont constituées d'un matériel continental d'origine européenne et sont représentées par des massifs qui se localisent dans deux zones d'affleurements (Durant Delga,

Chapitre1 : Situation géographique et étude géologie

1969 ; J-P Bouillin et al, 1984). - Au nord, par les massifs de la Grande et la petites Kabyles. Ces massifs représentent le socle. - Au Sud, par le substratum de la dorsale Kabyle ou chaîne calcaire.

I.2.1.1 Socle Kabyle :

C'est un ensemble de terrains plissés métamorphisés et souvent granitisés. - Il est représenté par des formations cristallophylliennes d'âge paléozoïque (Durand DELGA 1969, Raoult J.F, 1974 et BOUILLIN, 1977). Ce socle est généralement subdivisé en deux grands ensembles.

I.2.1.2 - Un ensemble supérieur :

Comportant de bas en haut des schistes noirâtres. Des psammites rouges et vertes, des grès calcaires. Il est surmonté en discordance par des formations siluriennes (Durand DELGA, 1969).

I.2.1.3 - Un ensemble inférieur

Composé essentiellement de gneiss œillés à interaction parfois puissantes de marbre et d'amphibolites. Le socle Kabyle forme par endroit un ensemble charrié sur les terrains mésozoïque et cénozoïques (J.P BOUILLIN 1977). Aux formations du socle Kabyle, s'ajoutent des roches magmatiques dominées par des roches granitiques par endroits de roche basique et ultrabasiques.

I.2.1.4 Dorsale Kabyle (chaîne calcaire) :

La chaîne calcaire est située au sud du socle et subdivisée selon (Durand-Delga M, 1969). Raoult J.F., 1974 ; Vila J.M., 1980) en trois unités qui sont du nord au sud :

- Unité interne: une série conglomératique à sa base et se termine par des formations Calcaires d'âge permo-triasique à néocomien suivi par une lacune du crétacé inférieur au crétacé moyen (Vila J.M., 1980) et un Eocène inférieur à moyen formé de calcaire néritique massif.
- Unité médiane: sa base est semblable à celle de l'unité interne sauf que la lacune concerne l'Aptien et l'Albien. Du Crétacé supérieur à l'Eocène la série est marnocalcaire à microfaune pélagique (Vila J.M., 1980).
- Unité externe: caractérisée par une série crétacée à éocène détritique avec un faciès Intermédiaire entre le domaine interne et médian du bassin maghrébin (Vila J.M., 1980).

I.2.2 Domaine des flyschs :

Ce domaine correspond aux nappes de flyschs dont le matériel crétacé-paléogène est expulsé vers le sud. Ces flyschs sont déposés dans un bassin de nature marine (Bouillin J.P., 1986).

Chapitre1 : Situation géographique et étude géologie

Ces flyschs ont été subdivisés du nord au sud en trois types, de nature distincte :

I.2.2.1 Flysch mauritanien:

IL s'agit d'une réunion en une seule série des flyschs de type Guerrouche (Durand-Delga M., 1969), il contient de bas en haut (Vila J.M., 1980) :

- Des radiolarites rouges du Malm avec un flysch argilo-gréseux d'âge Crétacé inférieur.
- Des calcaires conglomératiques ou micro conglomératiques à bandes silicifiées Blanches d'âge Crétacé supérieur.
- Des formations conglomératiques et micro conglomératiques d'âge Yprésien.

I.2.2.2 Le flysch massylien:

Flysch argilo-quartzitique d'âge Crétacé inférieur avec des ph tanites du Cénomaniens suivi par une alternance d'argiles et de micro-brèches du Crétacé supérieur (Raoult J.F., 1969).

I.2.2.3 Le flysch numidien:

Flysch gréseux Oglie-aquitainien, qui atteint le Burdigalien inférieur se dépose en discordance sur les premiers contacts tectoniques séparant les unités du domaine interne et la nappe du flysch mauritanien (Benabbas C., 2006).

La nappe numidienne correspond aux formations les moins tourmentées. Elle n'est que peu impliquée dans les accidents qui affectent l'édifice allochtone, sauf au nord de Constantine et d'El Aria, où elle se présente comme un ensemble écaillé (Benabbas C., 2006).

I.2.3 Domaine externe.

Ce domaine correspond à la marge de la Téthys du côté de la plaque africaine. En Algérie, ce dernier représente les zones telliennes. Il rassemble plusieurs séries à matériel marneux largement chevauchantes sur la plateforme Africaine.

Ce domaine peut se subdiviser en deux grands types de séries (Benabbas C., 2006) :

-1 Les séries telliennes

-2 Les séries de l'avant pays.

I.2.3.1 Les séries Telliennes.

Ce sont des séries très épaisses à dominante marneuse issue du sillon Tellien (Vila J.M.,1980), ces séries ont été découpées par les phases tectoniques tertiaires en trois grandes Entités, dont les limites suivent à peu près les lignes paléogéographiques du Crétacé, du Paléocène et de l'Eocène (Benabbas C., 2006). Selon (Vila J.M., 1980) ces séries sont Subdivisées du nord au sud en trois unités :

- Unités ultra-telliennes (épi telliennes).
- Unités telliennes sensu-stricto (mésos telliennes).
- Unités pénis-telliennes (cata telliennes).

I.2.3.1.1 Les unités ultra-telliennes :

La dénomination d'ultra-telliennes a été proposée par (Durand Delga M.1969). Ces unités sont caractérisées par des marnes et quelques bancs de calcaires au Crétacé et par des calcaires à silex et des marnes sombres à l'Eocène (Vila J.M., 1980).

I.2.3.1.2 Les unités telliennes sensu stricto :

Affleurent surtout dans la région de Sétif où elles couvrent l'espace qui va des chaînons côtiers des Bâbord aux premières pentes des monts du Hodna, caractérisées par des formations marneuses et marno-calcaires Crétacé et Paléogène (Vila J.M., 1980).

I.2.3.1.3 Les unités pénitelliennes et les unités méridionales à nummulites :

Le terme péni-tellien a été créé pour désigner une série allochtone du versant nord du djebel Zouaoui, dans le massif du Chattaba, près de Constantine, caractérisé par une séquence de carbonate et de vase allant du Lias au Maestrichtien (Vila J.M., 1980).

Les unités méridionales à nummulites apparaissent sous forme de lambeaux au sud des unités Pénitelliennes. Sont caractérisées par un Sénonien associé à des formations éocènes riches en nummulites, qui sont disposées irrégulièrement au front des unités telliennes (Vila J.M., 1980)

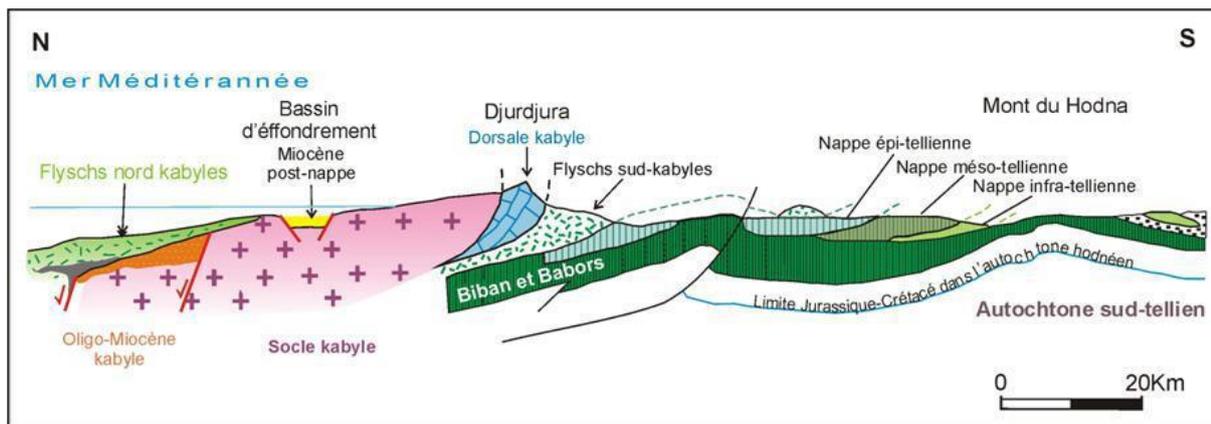


Figure 4: Coupe géologique schématique illustrant les relations structurales entre les différentes unités de la chaîne alpines d'Algérie orientale

I.2.3.2 Les séries de l'avant pays.

I.2.3.2.1 Unité néritique Constantinoise :

Appelée aussi mole néritique Constantinoise, elle forme des massifs isolés de tailles variables. Cette unité est caractérisée par des séries externes d'allochtonie notable à matériel carbonaté épais et massif du Jurassique- Crétacé, ces séries sont moins structurées au Miocène moyen. Cette unité s'est comportée de façon rigide durant les phases tectoniques alpines (C. Benabbas 2006) et chevauche les écailles des Sellaoua et les unités sud- sétifiennes (Vila J.M., 1980).

Pour les auteurs (Durand-Delga M., 1969), (Chadi M., 1991) et (Coiffait P.E., 1992) cette unité est autochtone.

I.2.3.2.2 Unités des écailles des Sellaoua :

Ces unités situées dans la partie la plus externe de la chaîne des Maghrébi des issues d'un large sillon à valeur Océanique.

Elles affleurent au sud-est des massifs composants l'unité néritique constantinoise et comprennent essentiellement des terrains marno-calcaires crétacés avec un léger apport détritique dans le Crétacé supérieur. Le Paléocène et le Lutétien supérieur sont marneux, par contre l'Yprésien est carbonaté et riche en Nummulites (Benabbas C., 2006); l'Oligocène est signalé par Vila J.M. (1980) et par Coiffait P.E. (1992).

I.2.3.2.3 Unités sud-sétifiennes :

Ces unités considérées allochtones pour (Vila J.M., 1980), sont caractérisées par des séries d'âge jurassique Crétacé de base marnocalcaire à Ammonites.

I.2.3.2.4 Le para autochtone Nord-aurésien :

Il constitue le bord septentrional de l'autochtone atlasique. Ce para-autochtone est défini par l'ensemble des structures formées par les monts D'Ain Laghouat et par les Djebels (Hanout, Guellif, Sidi Reghis) dans la région d'Aïn Kercha et d'Oum El Bouaghi.

Cet ensemble a été violemment affecté par la tectonique alpine. Le Trias de la région des lacs peut être interprété comme le cœur d'un vaste pli couché (Benabbas C., 2006).

I.2.3.2.5 L'autochtone Nord-jaurésien :

Il s'agit là du domaine atlasique, caractérisé par un ensemble Secondaire, plissé à la fin de l'Eocène selon des directions atlasiques, et par un Trias diasporique d'âge aptien, plus à l'Est, dans la région de l'Ouenza et les monts de Tébessa.(Farah A.S., 1991).

I.3 Les Différentes Phases Tectoniques :

L'évolution des Maghrébines au Mésozoïque et au Tertiaire s'intègre plus largement dans l'évolution géodynamique de la Méditerranée occidentale, caractérisée par l'affrontement des Grandes plaques européenne et africaine, d'abord par coulissage sénestre, puis en régime de collision, à partir de dates diverses dans le crétacé en fonction des dispositifs locaux, la collision devenant générale au crétacé supérieur.

I.3.1 Les événements tectoniques durant le Mésozoïque

A l'échelle des zones externes de l'Algérie nord orientale, les événements tectoniques durant cette époque sont peu étudiés. Les travaux réalisés jusqu'à présent s'accordent sur les Événements suivants :

I.3.1.1 Au Trias

Le Trias correspond à une période d'extension généralisée qui affecte le domaine Atlasique. Les bassins Triasique en Algérie ne sont connus que localement et en sub-surface.

Les présences des pélites et des évaporites très épaisses dans l'ensemble des domaines externes du Tell témoignent d'une forte subsidence à partir du Trias moyen et supérieur qui Est facilitée sûrement cette période de distension généralisée. Les séries évaporatives (sédimentation argilo-

Chapitre 1 : Situation géographique et étude géologie

gypseuse) sont accompagnées de coulées basaltiques et de carbonates du Keuper (Benabbas C., 2006).

I.3.1.2 Au Lias :

La distension provoque une subsidence différentielle. Celle-ci se poursuit jusqu'au Crétacé inférieur, permettant de la sorte la création de bassins marins ouverts dans les hauts atlas sahariens, Wildi W., (1983).

La plateforme constantinoise se distingue dès la fin du Lias comme un haut-fond à sédimentation calcaire dominante, (Guellal S., et al, 1973a).

I.3.1.3 Au jurassique moyen et supérieur :

A cette période, l'approfondissement et le caractère océanique des milieux sédimentaires se confirment et s'accroissent. Le bloc africain est décalé par un coulisage senestre par rapport à l'Ibérie et au bloc Alboran à partir de 165 Ma, engendrant probablement les premiers plissements dans les Babors vers la fin du Malm, avec des axes de plis d'orientation N-S. Le Malm représente la fin d'une période de distension et de subsidence caractérisant le Lias et le Dogger.

Dans les zones telliennes, les structures associées à la tectonique du Malm sont attestées par des discordances angulaires marquant la base du Crétacé inférieur. Plus au Sud, dans l'avant pays, la phase Jurassique supérieure se manifeste par une sédimentation terrigène au cours du Néocomien sans discordance angulaire notable, Wildi W., (1983).

I.3.1.4 Au Crétacé inférieur

Aucune phase tectonique importante n'est connue à cette époque ni en Ibérie ni en Afrique. L'origine du dépôt des sédiments détritiques sur la bordure Nord de l'Afrique et sur le continent ibérique ne serait pas tectonique mais climatique.

D'après l'interprétation des anomalies magnétiques dans l'atlantique Nord, les coulisages senestres E-W entre l'Ibérie et l'Afrique s'arrêtent pratiquement dès l'Aptien supérieur (110Ma), Wildi W., (1983). Suivant une transversale régionale, au Crétacé inférieur on peut noter une alternance de régressions et de transgressions individualisant ainsi des zones sédimentaires préfigurant déjà les unités structurales majeures, tel le domaine néritique, qui dès cette période, apparaît comme un entablement massivement carbonaté situé entre deux zones vaseuses, Guellal S., et al, (1973).

I.3.1.5 Au Crétacé supérieur

Au Crétacé supérieur, il semble qu'un épisode tectonique important correspondant au Cénomaniens inférieur a eu lieu. En effet sur la bordure Sud-ouest de la plate-forme néritique Constantinoise et dans le Sud sétifien, la sédimentation devient planctonique. Les marnes Pélagiques succèdent aux calcaires. Ce changement peut être relié à un épisode tectonique entraînant un relèvement du niveau eustatique. Cet épisode tectonique est le plus souvent traduit dans la sédimentation par une surface durcie (Hard-grounds) observable dans plusieurs massifs (Oum Set tas). Cette phase correspond à une phase compressive, qui coïncide avec le début de la rotation antihoraire de l'Ibérie par rapport à l'Europe. Cette phase compressive a engendré des plis orientés E-W ainsi qu'une forte schistosité de fracture dans les Babors affectant les niveaux du té-Vraconien. Elle est orientée conformément aux plissements W-E à SW-NE. Des évaporites triasiques se trouvent remaniées et ré-sédimentées dans des formations qui datent de l'Albien supérieur au Sénonien inférieur surtout, Wildi W., (1983).

A cette époque la différenciation paléogéographique, apparue au Crétacé inférieur, se poursuit et s'accroît par le fonctionnement des zones positives et négatives. Dans le domaine néritique,

Chapitre 1 : Situation géographique et étude géologie

la construction de l'entablement carbonaté s'achève avec l'émersion définitive de la fin du Crétacé supérieur. Cette émersion est confirmée par Guellal S et al, (1973).

- . Remaniement conglomératique du Vraconien-Turonien dans le Sénonien dans la partie Nord du domaine néritique (massif de Chettaba).
- . Présence de nombreux hard-grounds.
- . Turonien localement érodé ou absent.
- . Faciès néritique en lentilles (massif de Karkara).

I.3.2 Les événements tectoniques durant le Tertiaire

La chaîne alpine de l'Algérie Nord orientale s'est surtout structurée pendant les phases Tertiaires.

I.3.2.1 A l'Eocène :

Cette phase compressive se situe vers la fin du Lutétien, appelée phase fini-lutétienne ou phase atlasique d'après Durand Delga M., (1969) et Raoult J.F., (1974) ou encore phase priabonnaise selon Vila J.M., (1980). Elle marque la fin d'un grand cycle sédimentaire ayant débuté dès le Trias supérieur, et dont l'organisation n'a pas été perturbée malgré des manifestations tectoniques locales enregistrées avant le Cénomaniens, Aris Y., (1994).

Cette phase compressive est expliquée par la fermeture de la Téthys occidentale par la rotation de l'Afrique autour d'un pôle situé à l'Ouest de Tanger, conduisant à la collision entre la partie orientale de l'Alboran et la marge Africaine tellienne. Dans les zones internes La position relative E-W de la Kabylie par rapport au Tell est bloquée dès l'Eocène supérieur. Elle est associée à un métamorphisme régional, Wildi W., (1983).

Cette phase est associée à des accidents verticaux de direction NE-SW tels que l'accident N45°-50° E d'El K entour qui se prolonge jusque dans l'avant pays au Sud-ouest, entre les monts du Bélezma et ceux du Hodna correspondant à la « transversale de Constantine ».

I.3.2.2 Au Miocène

I.3.2.2.1 Phase compressive du Burdigalien

La phase Miocène est caractérisée par une direction de raccourcissement N-S. La partie Occidentale de la plaque d'Alboran continue sa migration vers l'Ouest, pour entrer finalement en collision avec la marge rifaine de l'Afrique. Cette migration contribue à l'ouverture du bassin nord algérien.

Cette phase se manifeste par :

- L'avancée de la nappe numidienne vers le Sud et la formation des olistostromes kabyles dans une dépression septentrionale.
- Un bombement à l'aplomb du bord kabyle méridional, où s'étaient antérieurement empilées les unités de flysch sur les nappes telliennes au Priabonien.
- Des structures plissées, au sud du domaine kabyle.

A la fin du Miocène inférieur et au début du Miocène moyen, des bras de mer envahissent des golfes de la partie septentrionale des chaînes algériennes. Dans les Babors, les premiers sédiments post-nappes marins se déposent. Cette transgression va de pair avec une phase volcanique Calco-alcaline et un plutonisme qui amène en place les intrusions granitiques en grande Kabylie, dans les Babors et en petite Kabylie. Les datations radiométriques y indiquent souvent des âges entre 12 et 16 Ma.

I.3.2.2 Phase tangentielle tortonienne -phase alpine

Pour Vila J.M., (1980), c'est la phase tortonienne majeure, à vergence Sud qui est responsable de vastes raccourcissements impliquant les formations postérieures au Burdigalien supérieur dont la nappe numidienne. Toujours selon le même auteur, cette phase serait responsable de la genèse de la nappe néritique constantinoise, des unités allochtones des Sellaoua, de l'ensemble « sud-sétifien » et des « unités méridionales à nummulites ».

Cette phase a engendré dans l'ensemble de Algérie Nord orientale des chevauchements vers le Sud des unités méridionales à nummulites, des unités sud-sétifiennes et des écailles de Sellaoua, ainsi que des plissements à axes E-W des monts du Hodna jusqu'à la transversale de l'Aurès ; genèse des « plis emboutis » qui interfèrent et reprennent les plis éocènes. Pour revenir à la notion de tectonique tangentielle tortonienne selon Vila J.M., du nord au sud et de haut en bas de l'édifice structural on distingue :

- La zone intermédiaire est fortement plissée (Burdigalien-Langhien).
- .La zone nappée méridionale, où se manifestent de vastes mouvements anormaux, impliquant les formations postérieures au Burdigalien supérieur.
- .Les nappes telliennes sont reprises en bloc.
- .L'ensemble allochtone sud-sétifien constitue un empilement de lames en série normale.
- .La nappe néritique constantinoise et les unités allochtones de type Sellaoua relaient en plan l'ensemble allochtone sud-sétifien vers l'Est.

I.3.3 La Tectonique récente :

Cette phase tectonique post-nappes est responsable de l'orographie actuelle. Elle a induit le comblement des bassins mio-pliocènes, alimentés par la destruction des reliefs environnants.

A l'échelle du Constantinois, les structures attribuées à cette tectonique évoquent une tectonique polyphasée. En effet, deux phases successives de distension et de compression ont affecté les formations tortoniennes, entraînant ainsi un resserrement des structures préexistantes, et la formation de plis qui s'alignent en gros sur la direction atlasique. Parmi ces plis on note ceux de Djebel Ouahch, du massif du Chettaba et du Djebel Djaffa. Par ailleurs, des failles inverses parfois décrochantes ou chevauchantes ainsi que des déformations cassantes de direction E-W et NW-SE, tel l'accident de M'cid Aïcha-Debbar d'une centaine de kilomètres, peuvent être observées. Le long de cet accident, des chevauchements Nord-Sud post-miocène sont localement signalés, Guellal S., et al, (1973).

I.4 Litho-Stratigraphie de la région de Constantine

La région de Constantine avec sa morphologie exceptionnellement accidentée caractérisée par des massifs qui appartiennent au domaine externe de la chaîne des Maghrébines. Les principaux traits stratigraphiques de la région correspondent en fait à des formations calcaires jurassiques crétacées avec une couverture marnocalcaire d'âge sénonien supérieur à éocène avec la présence de lacunes de sédimentation (Aris Y., 1994).

I.4.1 Trias

Le Trias exotique correspond aux plus anciens terrains des zones externes, Il est essentiellement évaporatiques et se présente en épaissements diapiriques et en lames injectées le

long de certains accidents. Représenté par des masses de gypse et d'argile, de couleur rouge lie devin bien caractéristique, contenant le plus souvent des blocs calcaro-dolomitiques, des cargneules, des marnes bariolées verdâtres et des blocs de roches volcaniques (Benabbas C., 2006).

Parmi les affleurements connus dans le Constantinois, on peut citer du Nord au Sud :

-Les affleurements des massifs du Kheneg et Djebel Akhal, au Nord-Ouest et à l'Ouest de Constantine.

-Ceux de la dépression du Chettaba-Djebel EChabka Aïn El Kebch, à l'Ouest et au Sud-Ouest de Constantine.

-Et ceux liés aux formations tertiaires situées au Sud des massifs du Felten et de l'Oum Set tas.

I.4.2 La nappe néritique constantinoise

Plateforme marine caractérisée par des formations principalement carbonatées du jurassique supérieur au sénonien transgressif.

I.4.2.1 Jurassique supérieur

Le Jurassique supérieur est essentiellement carbonaté. Il comprend des dolomies noires, largement cristallines, surmontées par une barre de 90 à 100 m de calcaires massifs (Benabbas C., 2006).

I.4.2.2 Le Néocomien

Il est carbonaté et débute par une série montre une alternance entre les calcaires fins et des marnes rosées ou jaunâtres. Il se prolonge par 150 m de calcaires à silex, sauf au Djebel Guerioum et Fortass. Plus à l'Ouest dans les monts d'Ain M'lila, le Néocomien est uniquement carbonaté et comporte des alternances calcaro-dolomitiques sur 300 m environs.

I.4.2.3 Le Barrémien

Le Barrémien est calcaro-dolomitique, représenté par une épaisse série (250 à 300m) de calcaires massifs, clairs dans lesquelles s'intercalent de rares passées de marnes grises, il est riche en microfaune (Benabbas C., 2006; Aris Y., 1994).

I.4.2.4 L'Aptien

Ce dernier débute par 50 m de calcaires massifs en gros bancs, pour se poursuivre sur 100 m.

À 120 m, par des calcaires micritiques noirs, riches en Milliolidés et en débris de Rudistes.

Le terme sommital aptien est constitué d'une corniche de 80 à 100 m de calcaires massifs (Benabbas C., 2006).

L'aptien se termine par une surface d'érosion originale (Aris Y., 1994), il afflue au Djebel karkara et Zouaoui sous forme d'un ensemble de marnes et de calcaires marneux biomicritiques et graveleux. Et selon (Vila J.M., 1980) des formations correspondantes au Clansayésien (Aptien sup) affleurent au Djebel Felten.

I.4.2.5 L'Albien et le Vraconien

Ils sont constitués de bancs calcaires noirs (Benabbas C., 2006).

Dans le massif de Djebel Frikitia au sud-ouest de Chettaba, l'Albien est représenté par une série constituée de marnes et de calcaires noduleux à Ammonites, Mélobisiées et des hedbergelles de types washitensis, avec une association à foraminifères benthiques et à Ostracodes (Vila J.M., 1980). Il afflue aussi au Dj Felten (identique à celui de Djebel Frikitia) et au Djebel Zouaoui.

I.4.2.6 Le Cénomanién

Les formations cénomaniennes sont carbonatées et peuvent atteindre 250 à 300 m d'épaisseur (Benabbas C., 2006). Il manque dans la plupart des massifs méridionaux de la Nappe néritique Constantinoise, et il est pélagique dans la série très septentrionale du Kef Hahouner (Vila J.M., 1980).

I.4.2.7 Le Turonien

Comprend des calcaires rubanés à patine blanche et à cassure grise, et par de grosses barres de calcaires massifs clairs à rudistes et à minces intercalations de calcaires sombres (Ben abba C., 2006). Selon (Vila J.M., 1980) son affleurement au Djebel Oum Set tas peut lier au fonctionnement de failles de direction Atlasique.

I.4.2.8 Le Sénonien transgressif

La sénonienne représente une couverture des affleurements septentrionaux de la nappe néritique constantinoise.

Le Sénonien débute par une discordance du ravinement et des niveaux d'allure microbréchique précédant 20m environ de calcaires noirs, micritiques, à fins débris organogènes et à silex noir. Ces couches ont fossilisé de petites failles verticales à faible rejet. Au-dessus d'une nouvelle surface de ravinement, on remarque, notamment à l'ancrage Nord du pont suspendu de Constantine quelques décimètres de micrites grises ou jaunâtres à aspect feuille tété à gros cristaux de pyrite, avec une mince intercalation marneuse crème. (Vila J.M., 1981).

I.4.3 Les nappes telliennes

I.4.3.1 La nappe ultra-tellienne

L'unité ultra-tellienne est largement développée dans le Constantinois. Elle est représentée par des formations marneuses et marno-calcaires de faciès généralement clairs d'âge Barrémien à Eocène.

I.4.3.2 Les nappes telliennes sensu-stricto

Localisées dans le triangle Chelghoum El Aïd-Constantine-Sigus à matériels allant du Sénonien inférieur à l'Eocène, ces nappes sont semblables à la série de type Djemila (Vila J.M., 1980).

Elles sont caractérisées par :

- . Des marnes grises ou beiges avec de minces intercalations marno-calcaires (250 à 300m d'épaisseur) d'âge Sénonien inférieur.
- . Des marno-calcaires d'âge Sénonien supérieur, dont la couche peut atteindre localement 250 à 300 m.
- . Un ensemble monotone de marnes ou d'argiles carbonatées noires du Maastrichtien au Paléocène.

- . Des calcaires massifs blancs à patine bitumineuse d'âge Yprésien-Lutétien inférieur représenté par une série d'environ 200m.
- . Des marnes grises ou noires à boules jaunes Lutétien à Priabonien.

I.4.3.3 La nappe péni-tellienne et unités méridionales à nummulites

C'est une alternance de carbonate et de vase allant du Lias au Paléocène :

- . Lias : calcaires massifs.
- . Dogger : calcaires oolithiques, oosparites dont la couche peut atteindre 300m.
- . Malm : dolomies noires sableuses, calcaires à silex et micrites en petits bancs.
- . Crétacé inférieur : pelitico-marneux, micritique et à rares niveaux gréseux.

- . Albo-cénomaniens : représenté dans les gorges de Hammam Grouz par une barre calcaire de près de 200m d'épaisseur.
- . Crétacé moyen : calcaire, silex noirs en petits bancs.
- . Sénonien inférieur : conglomérats avec passages marneux.
- . Sénonien supérieur : il débute par une barre conglomératique (50 à 100m), devient marneux au Campanien supérieur et se termine par une barre de calcaire-marneux claire au sommet.
- . Maastrichtien au Paléocène: marnes grises ou noires que l'on rencontre uniquement sur le versant Sud-Est du Djebel Chettabah. (In Farah A.S., 1991).

I.4.4 La nappe numidienne ou flysch numidien

Le flysch Numidien est représenté par une série argilo-gréseuse d'âge Oligocène à Burdigalien basal.

La série Numidienne typique est caractérisée, de la base au sommet, par une succession de trois types de faciès : des argiles à Tubotomaculum, des grès épais alternant avec des niveaux argileux et des marnes à silexites vers le sommet.

- . Les argiles de base à Tubotomaculum dites sub-numidiennes, contiennent des passées gréseuses renfermant localement des niveaux à blocs variés d'âge Eocène. Ce terme est daté Oligocène depuis les travaux de Durand-Delga et Magné (1958).
- . Les grès numidiens, présentent une épaisse série. Au Djebel Grouma, près d'Oued Zénati à l'Est de Constantine.

On note dans cette série gréseuse trois ensembles :

- . Un premier ensemble gréseux, formé de grosses barres, et débutant par des alternances de grès et d'argiles (100 m environ) à *Globigérines* du Stampien supérieur.
- . Un deuxième ensemble représenté par des argiles à bancs de grès intercalés d'âge Aquitanien inférieur à Burdigalien, vers le sommet.
- . Le troisième est gréseux et moins épais (200 m). Il est rattaché à un âge au moins.
- . Burdigalien supérieur par rapport aux derniers termes de l'ensemble argileux sous-jacent.

I.4.5 Les séries post-nappes.

I.4.5.1 Le Mio-Pliocène continental.

Des conglomérats rougeâtres marquent la base du Miocène inférieur et constituent une zone limitée le plus souvent par des failles. Le Miocène moyen, Laguno-lacustre, afflue surtout dans la dépression séparant Constantine de la chaîne Numidique et comprend deux termes : un terme inférieur formé de marnes grises à gypse et Gastéropodes, un terme supérieur comprenant des marnes légèrement beiges où apparaissent des chenaux. Alors que le Miocène supérieur continental est sous forme de dépôts détritiques rougeâtres au Pliocène. La sédimentation est composée d'argiles rougeâtres quelquefois sableuses et de calcaires lacustres.

L'ensemble inférieur de la série du bassin de Constantine est assimilé au Miocène.

I.4.5.2 Le Quaternaire

Des éboulis, des alluvions et des formations de pente constituent le Quaternaire (Bean abbas C., 2006).

.Les éboulis se sont surtout développés en bordure des reliefs numidiens et des massifs calcaires comme le Djebel Oum Settat.

.Les alluvions récentes des oueds correspondent à des limons, des graviers et des galets roulés.

.Les alluvions anciennes des oueds se composent de cailloux roulés, limons et graviers parfois, encroûtés, provenant d'anciennes terrasses. Les alluvions anciennes des plateaux sont composées de cailloux roulés, limons et graviers. Elles sont souvent cimentées par une croûte calcaire.

.Les formations de pente correspondent à des glacis polygéniques qui forment des surfaces très faiblement inclinées, près des plaines recouvertes d'un matériel élastique, avec de vastes placages sur les versants marneux. Les glacis anciens de Constantine, dans la région d'El Aria, sont constitués exclusivement de blocs du Numidien bien roulés.

.Les croûtes calcaires du Villafranchien sont directement installées sur des calcaires et des conglomérats fossilifères dans lesquelles il est difficile de situer la limite entre le Pliocène supérieur et le début du Villafranchien.

. Tufs calcaires ou Travertins du Mansourah. Ils correspondent soit à des zones de sources chaudes, soit à des formes de concrétions plus ou moins vacuolaires gris à jaunâtre.

I.5 Conclusion:

Les premières constatations, concernant la géologie de Constantine, nous amènent aux conclusions suivantes.

- La carte géologique met en évidence une couverture post-nappes Mio pliocène et quaternaire-conglomératique.
- Le tectonique néogène post-nappes et quaternaire, se distingue par des plis d'échelle kilométrique à grand rayon de couverture, et des failles à rejet vertical important.
- La morphologie actuelle de la région est conforme dans ces grands traits à la structure tectonique récente.
 - L'aspect morpho structural de la région est très complexe.

Chapitre 2 : Hydro climatologie.

I.6 Introduction :

Le climat est défini comme « la synthèse des conditions météorologiques dans une région donnée, caractérisée par des statistiques à long terme (valeurs moyennes, variances, probabilités de valeurs extrêmes, etc.) des éléments météorologiques (températures, précipitations, vents) dans cette région

Le climat à la surface de la Terre est régi par les lois du système climatique, système complexe dont les principales composantes sont l'atmosphère, la lithosphère (surface terrestre), l'hydrosphère (lacs, mers, océans et autres plans d'eau), la cryosphère (les glaces du monde entier) et la biosphère (l'ensemble des êtres vivants, en particulier la végétation, ainsi que la matière organique des sols). Ces 5 composantes sont en interaction permanente par l'intermédiaire de phénomènes physiques, chimiques et biologiques tels que le rayonnement

Les eaux de surface sont très dépendantes du climat, et par conséquent ce dernier à une influence immédiate sur les réserves en eau. Il est de plus en plus évident que l'influence du changement climatique est de plus en plus ressentie sur la planète Terre et l'Algérie dans le continent Africain reste très exposée aux stress climatiques.

I.7 Les paramètres de climat :

La région de Constantine est soumise à un régime climatique double :

- Au Nord : c'est un régime subhumide avec des précipitations moyennes annuelles dépassant le plus souvent les 650 mm.
- Au Sud : c'est plutôt un régime semi-aride qui l'emporte avec une pluviométrie moyenne annuelle le plus souvent en dessous des 650 mm.

Le climat de la région Est continental est caractérisé par des maximales de 25°-45° en été et des minimales de 0°-12° en hiver.

La combinaison des précipitations et des températures permet de définir des domaines bioclimatiques. C'est grâce à un tracé sur un Climagramme combinant Q (Quotient pluviométrique d'Emberger) en ordonnée et m (moyenne des températures minimales du mois le plus froid) en abscisse, on trouve que le climat de la région d'étude est du type semi-aride ($300-350 < P < 550-600$ mm). Ce climat est caractérisé par une alternance de saisons sèches (juin à septembre) et de saisons humides (octobre à avril).

I.7.1 Les précipitations et les températures :

Cette étude se fera sur la base des données de la station climatique de la région de Constantine qui trouve dans le site www.infoclimat.fr pour la période de 37 ans soit de 1982 à 2019.

I.7.1.1 Evolution annuelle des précipitations :

L'examen de la courbe de variation des précipitations annuelles (Figure) montre que l'année 2004 est l'année où il a été enregistré le maximum de précipitations avec 924.6 mm. Cependant le minimum a été enregistré en 2005, avec 479.6 mm. La moyenne étant de 667.9 mm.

A l'échelle interannuelle, les précipitations annuelles des années (2003, 2005, 2006, 2007, 2010, 2012) sont inférieures à la moyenne interannuelle (667.9 mm). Ces années sont considérées comme sèches, les années (2004, 2008, 2009, 2011, 2013) sont considérées comme humides.

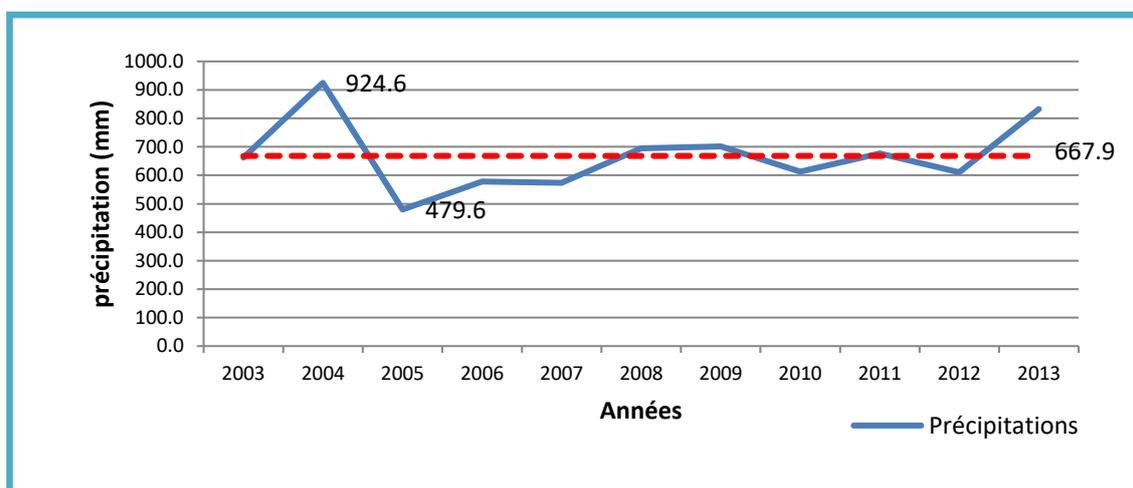


Figure 5: Evolution annuelle des précipitations.

I.7.1.2 Précipitations Mensuelles.

On a présenté les précipitations mensuelles de station de Constantine avec le tableau ci-dessous.

La courbe de la variation des précipitations mensuelles interannuelles (Figure .7) montre que la valeur la plus élevée coïncide avec la saison humide, au mois de décembre (109.3 mm) tandis que la valeur la plus faible coïncide avec la saison sèche, au mois de juillet (1.7 mm).

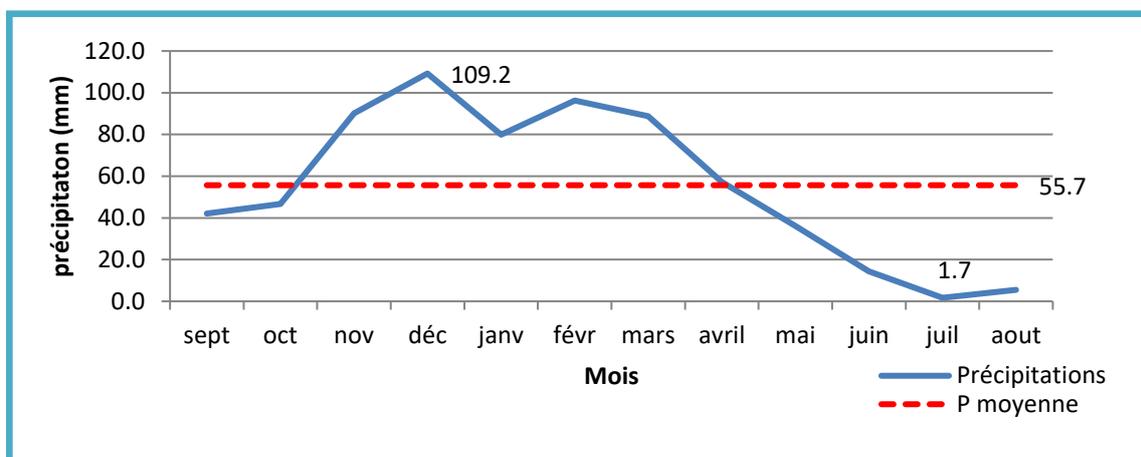
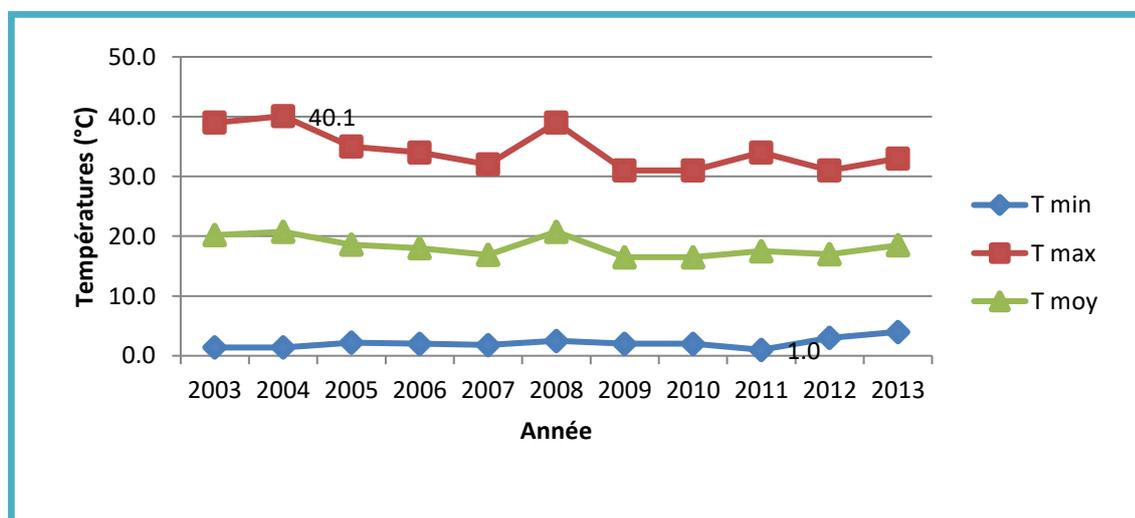


Figure 6 : Précipitations mensuelle .

On trouve les précipitations maximales au mois de out, et on observe le mois plus sec est juin et jui.

I.7.2 Evolution annuelle des températures :

Les courbes de températures annuelles (Figure) montrent la variation des températures maximales et minimales. La température maximale de (40.1 °C) a été enregistrée en 2004 tandis que la température minimale de (1.0 °C) a été enregistrée en 2011. La température moyenne annuelle est de 16.5 °C.



Chapitre 2 : Hydro climatologie.

Figure 7: Evolution des températures annuelles

I.7.3 . Evolution mensuelle interannuelle des températures :

La courbe de la variation des températures mensuelles interannuelles (Figure) montre que la valeur la plus élevée coïncide avec le mois de juillet (26.9 °C), tandis que la valeur la plus faible est enregistrée au mois de février (7.9 °C).

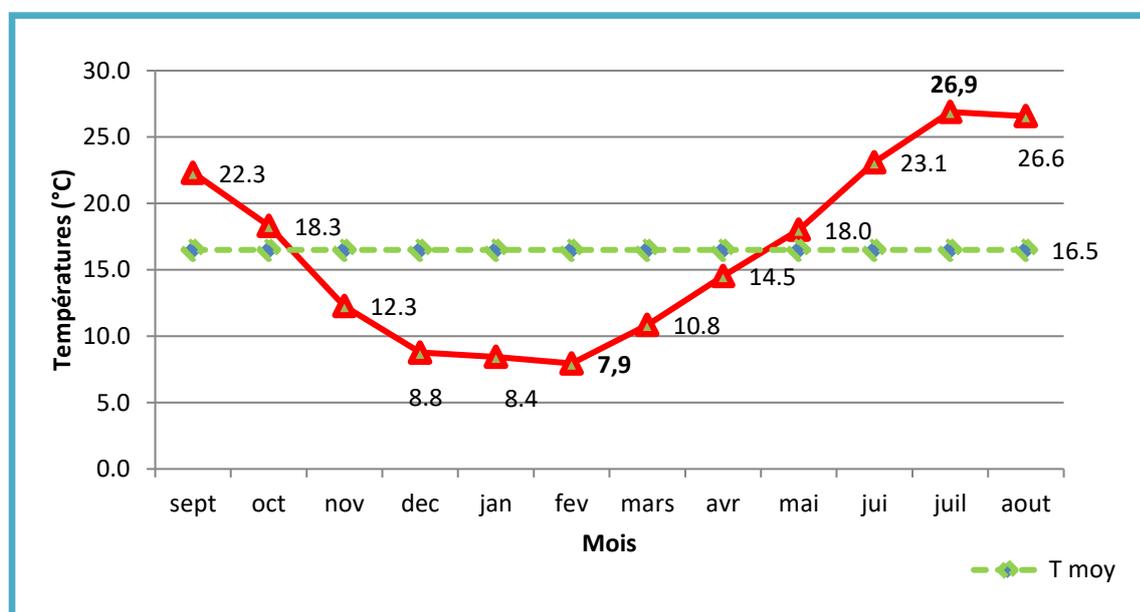


Figure 8: Evolution mensuelle interannuelle des températures

Enregistrer dans ce tableau le mois le plus froid est **Janvier** alors que le plus chaud est **Juillet**.

I.7.4 Les indices climatiques :

Pour déterminer le type de climat, nous avons utilisé deux méthodes qui pourront nous renseigner sur le type de climat régional :

I.7.4.1 Indice de Martonne (1925):

Chapitre 2 : Hydro climatologie.

En 1925 DE. Martonne avait établi un indice en fonction des températures et des précipitations (Figure). Il est calculé par les relations suivantes :

$$I = P/(T+10)$$

Où:

P : précipitation annuelle moyenne (mm).

T : température annuelle moyenne (°C).

Suivant les valeurs de I obtenues, De Martonne a établi la classification suivante :

- I < 5 le climat est hyperaride
- 5 < I < 7.5 le climat est désertique
- 7.5 < I < 10 le climat est steppique
- 10 < I < 20 le climat est semi-aride
- 20 < I < 30 le climat est tempéré
- I > 30 le climat est humide.

Pour la région de Constantine en 2019 est : P= 667.9mm et T= 16.5 °C, I= 25.20

Donc selon la valeur de cet indice, le climat dans la région de Constantin est tempéré.

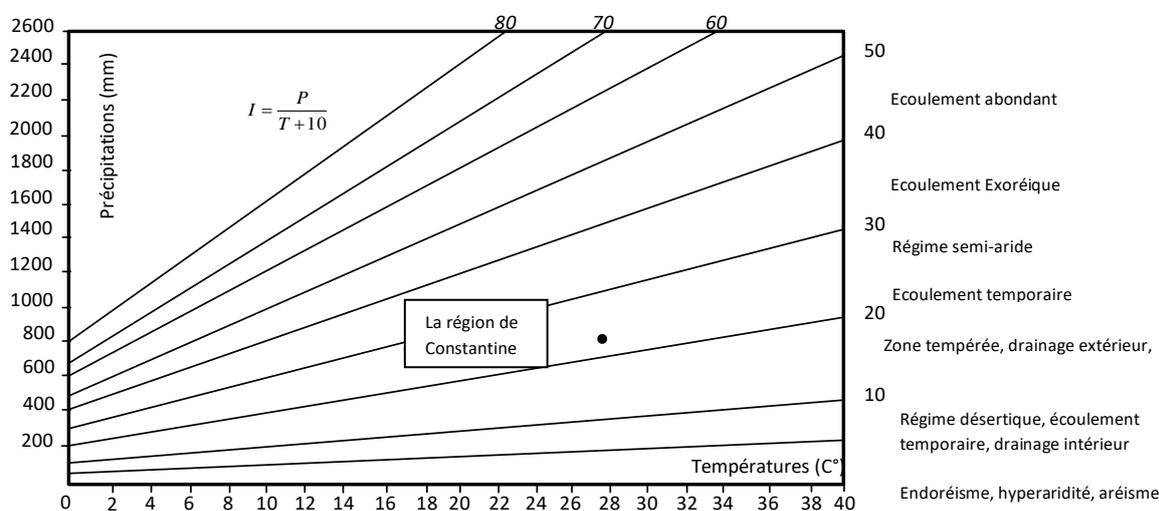


Figure 9: Abaque de l'indice d'aridité annuel de Marton 1925

I.7.4.2 Climatogramme de Péguy :

On trouve dans ce diagramme on reporte les températures et les précipitations mensuelles respectivement en abscisses et en ordonnées, de chaque mois pour chaque station à part.

On réunit alors les douze points présentant les mois, par une ligne brisée. Le diagramme est subdivisé en secteurs, voir mois froids et humides, mois tempérés et mois arides. Ainsi on aura caractérisé le climat de chaque mois.

Chapitre 2 : Hydro climatologie.

On constate pour la station de Constantine (fig 5), que seuls les mois de juin, juillet et août sont groupé sous le secteur des mois arides. Le reste des mois de l'année, sous le secteur des mois tempérés.

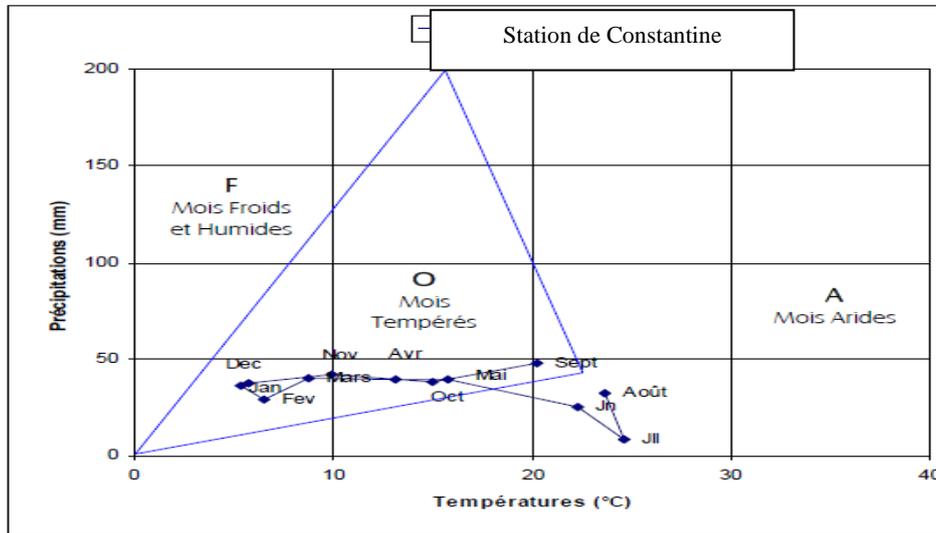


Figure 10: Climato gramme de PEGUY (Station de Constantine).

I.7.5 Régime climatique :

Nous déterminer le régime climatique de la région nous avons utilisé plusieurs méthodes, pour ça.

I.7.5.1 Méthode d'Eu verte

Le rapport P/T permet de définir le régime climatique :

$P/T < 1$: Régime très sec.

$1 < P/T < 2$: Régime sec.

$2 < P/T < 3$ Régime sub- humide.

$P/T > 3$ Régime humide

Chapitre 2 : Hydro climatologie.

mois	T (°C).	P (mm).	P/T
Jan	6.2	97.2	15,6
Fève	7.5	47.6	6,3
Mars	10.5	50.4	4,8
Avril	13.5	38.2	2,8
Mai	16.5	60.4	3,6
Jun	25.7	10	2.25
Juilly	28	10.7	2.4
Out	27.9	109.2	3,9
Sep	22.8	80.8	3,5
Oct	18.3	69.2	3,7
Nov	11.1	92.8	8,3
déc	10.3	68.4	6,6

Tableau 1 : donne une classification du climat.

Dans la partie amont du sous région (Constantine), règne un régime à climat humide durant la période septembre– Mai et la période Mai– Juilly un régime à climat très sec.

I.7.5.2 Diagramme Ombrothermique De Gaussen :

La combinaison des deux principaux facteurs climatiques, la température et les précipitations, est intéressante dans la mesure où elle permet de déterminer les mois véritablement secs. (Figure). L'application de cette technique à la région d'étude, montre qu'elle est caractérisée par un climat possédant une saison sèche qui s'étend du mois Mai jusqu'au mois d'Octobre, et une saison humide qui s'étend le reste de l'année.

Chapitre 2 : Hydro climatologie.

mois	T (°C).	P (mm).
Jan	6.2	97.2
Fève	7.5	47.6
Mars	10.5	50.4
Avril	13.5	38.2
Mai	16.5	60.4
Jun	25.7	1.7
Juilly	28	10.4
Out	27.9	109.2
Sep	22.8	80.8
Oct	18.3	69.2
Nov	11.1	92.8
déc	10.3	68.4

Tableau 2: tableau de valeur des donnes de précipitation et de température de l année 2019.

T : la température.

P : les précipitations.

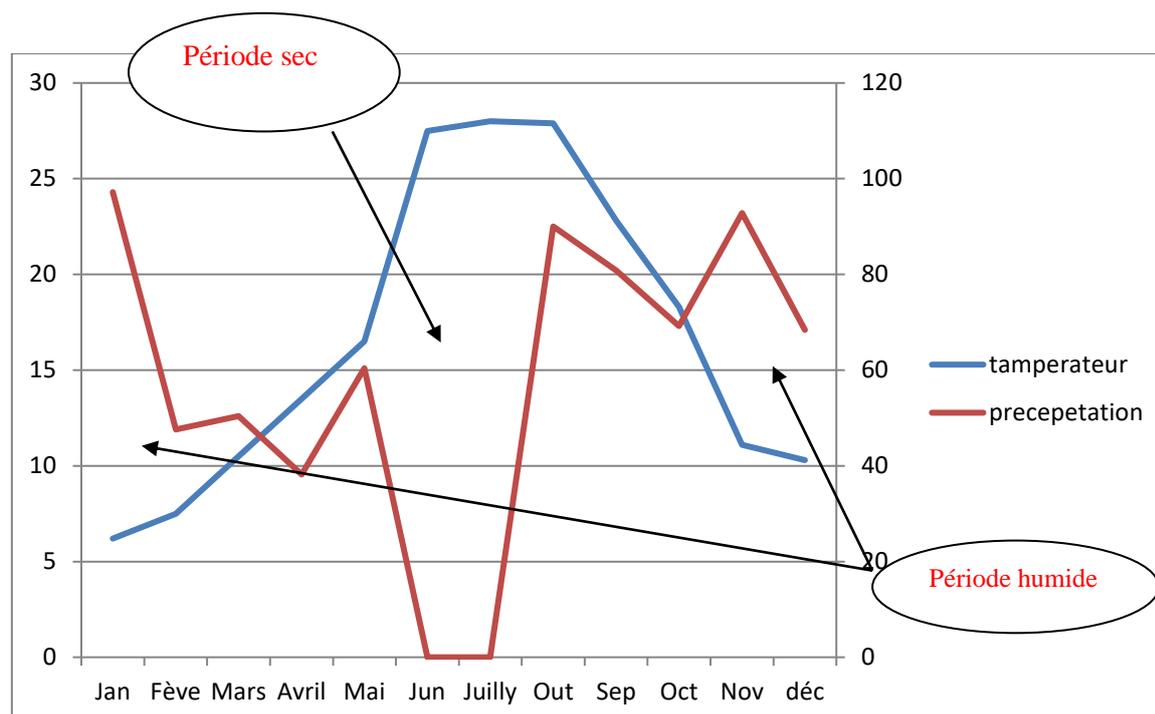


Figure 11: Diagramme Ombrothermique de la station du Constantine.

Donc la région de Constantine est un climat tempéré subhumide, caractérisé par deux saisons, l'une humide et froide et l'autre sèche et chaude.

Pour mieux de Précision les différents facteurs qui le composent, nous allons étudier en détail l'évolution des paramètres climatiques notamment les précipitations, les températures.

I.8 Calcul de la lame d'eau Précipitée sur le sous bassin :

La détermination de la moyenne pluviométrique est nécessaire pour l'étude de l'abondance pluviale, elle concerne la variabilité des précipitations sur une longue série d'observation. Elle est égale au quotient des précipitations en mm par la superficie en Km². Pour réaliser nos calculs, nous avons choisi différentes méthodes.

I.8.1 Moyenne Arithmétique :

C'est la méthode la plus simple, et qui consiste à calculer la moyenne arithmétique des hauteurs des pluies, enregistrées sur l'ensemble des stations du sous région.

$$P = \sum \frac{P_i}{n}$$

P_i : étant la pluviométrie moyenne de chaque station

N : nombre de stations utilisées.

I.8.2 Méthode des isohyètes :

Son principe consiste à mesurer la surface existante entre les lignes d'égales pluviométrie (isohyètes) par planimétrie on multiplie cette surface (S.I) à chaque fois par la moyenne des valeurs obtenues Donc la lame d'eau précipitée sera égale à :

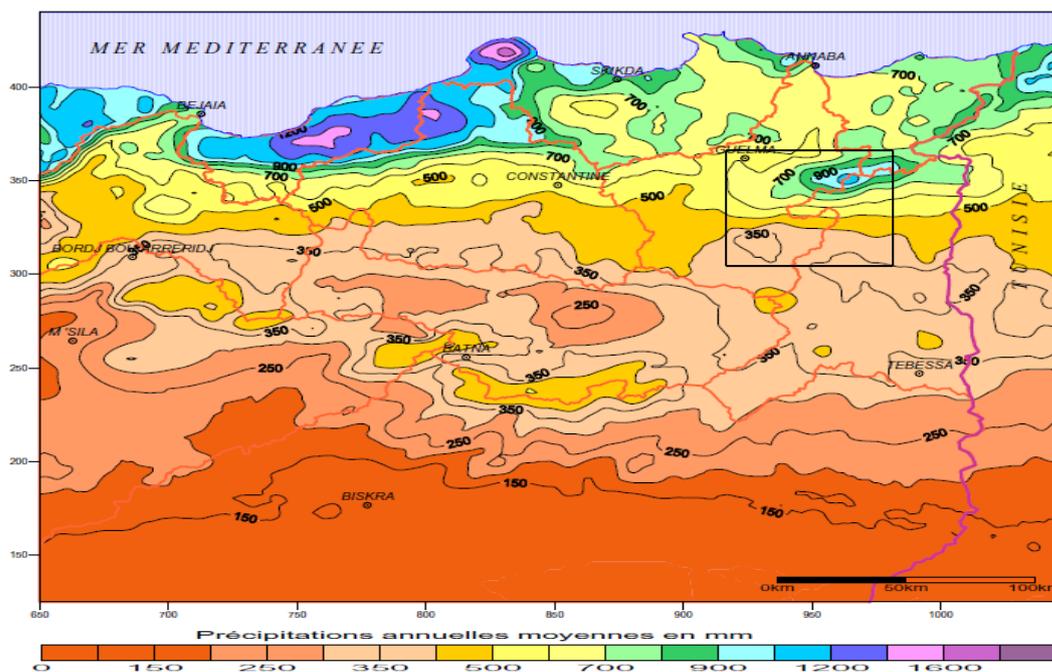


Figure 12: Carte des précipitations annuelles moyennes de l'Est algérien (1965-95).

I.9 Evapotranspiration :

L'écoulement, l'infiltration et l'évapotranspiration sont les processus essentiels qui affectent les précipitations à leur contact avec le sol. Le taux d'évapotranspiration est déterminé par l'ensemble des processus d'évaporation (phénomène physique) et transpiration (phénomène biologique lié à la couverture végétale). Ces deux phénomènes dépendent du climat et de ses variations, ainsi que de plusieurs paramètres : température, précipitation, humidité de l'air. Les paramètres utilisés dans le calcul du bilan sont soit : des paramètres mesurés dans des postes ou stations climatiques, soit des paramètres calculés empiriquement (ETP et ETR).

L'évapotranspiration dépend non seulement de la température, mais aussi des conditions météorologiques et de la disponibilité en eau des réserves du sous sol. On distingue évapotranspiration potentielle et évapotranspiration réelle.

I.9.1 Evapotranspiration Potentielle :

C'est la quantité d'eau maximum évaporée à partir d'un sol saturé. Elle constitue un facteur primordial dans l'évaluation du bilan hydrique. Nous utilisons les formules de Thorntwaite et Serra pour le calcul de l'ETP.

I.9.1.1 Formule de Thorntwaite

$$ETP \text{ (mm)} = 16 * \left(\frac{10 * T}{I}\right)^\alpha$$

ETP : évapotranspiration potentielle mensuelle en (mm)

T : température moyenne mensuelle en (°C)

I : indice thermique obtenu par la formule

$$I = \sum i \text{ avec } i = \left(\frac{T}{5}\right)^{1.514}$$

a : indice dépendant de la température, et calculé par la formule :

$$a = 0.49239 + 1.792 \times 10^{-2} \times I - 7.71 \times 10^{-5} \times I^2 + 6.75 \times 10^{-7} \times I^3.$$

Les valeurs de l'ETP calculées par la méthode de C.W.THORNTHWAITE sont pour plusieurs auteurs surestimées dans les régions tropicales humides et équatoriales et sous estimées dans les régions arides et semi-arides, est multipliée par un facteur de correction K, qui est en fonction du temps, du mois et de la latitude du lieu. Le calcul est reporté sur le (Tableau).

I.9.1.2 Formule simplifiée de Serra :

$$ETP \text{ (mm)} = 16 * \left(\frac{10 * T}{I}\right)^\alpha$$

Chapitre 2 : Hydro climatologie.

T : température moyenne mensuelle (°C).

$$I = \sum i \Rightarrow i = (0.09 * T)^{1.5}$$

$$\alpha = \frac{16}{100} I + 0.5$$

I.9.1.3 Formule de l'ANRH (PENMAN) :

Cette formule est calée sur le modèle de PENMAN et écrite sous forme simplifiée pour l'adapter à la formule de BLANEY et CRIDDLE.

$$ETP(A.N.R.H) = K_r \times K_m \times (H - 187) \times (0.032t + 0.077)$$

K : Coefficient correctif régional lu sur la carte iso-lignes variant entre 0.85 et 1.25.

K_m : Coefficient correctif mensuel compris entre 0.90 et 1.22.

H = il représente la latitude en coordonnées Lambert. H , en fait donne le nombre d'heures par mois d'ensoleillement.

On a calculé les valeurs l'ETP avec la méthode de C.W. THORNTHWAITE sont pour plusieurs auteurs surestimées dans les régions tropicales humides et équatoriales et sous estimées dans les régions arides et semi-arides, est multipliée par un facteur de correction K , qui est en fonction du temps, du mois et de la latitude du lieu. Le calcul est reporté sur le (Tableau)

Où :

ETP : évapotranspiration potentielle mensuelle (mm)

ETPc : évapotranspiration potentielle mensuelle corrigée (mm)

K : facteur de correction.

Mois	S	O	N	D	J	F	M	A	M	J	J	A	Année
T(°C)	22,3	18,3	12,3	8,8	8,4	7,9	10,8	14,5	18,0	23,1	26,9	26,6	16.5
i	9,61	7,13	3,88	2,33	2,21	2,01	3,23	5,03	6,95	10,14	12,77	12,56	/
I=∑i	77,85												/
a	1,75												/
ETP(mm)	101	71	36	20	19	16	28	48	69	107	140	137	792
K	1,03	0,97	0,86	0,84	0,87	0,85	1,03	1,1	1,21	1,22	1,24	1,16	/
ETPc (mm)	104,0	68,9	31,0	16,8	16,5	13,6	28,8	52,8	83,5	130,5	173,6	158,9	878,9

I.9.2 Calcul de l'évapotranspiration réelle (ETR) ou déficit d'écoulement :

Les pertes d'eau d'un sol atteignent l'ETP si elles sont supérieures ou égales au stock d'eau de la RFU.

En cas d'insuffisance elles sont limitées à une quantité plus petite, cette limite est appelée l'évapotranspiration réelle [Castany, G., 1982]. Pour l'estimation de l'ETR, on a utilisé plusieurs formules et méthodes qui utilisent la température et les précipitations.

I.9.2.1 Formule de TURC :

Cette formule est applicable à tous les climats du globe. Elle fait intervenir les précipitations et les températures moyennes annuelles.

$$ETR = \frac{P}{\sqrt{0.9 + \left(\frac{P}{L}\right)}}$$

Où :

ETR : Evapotranspiration réelle (mm)

P : précipitation moyenne annuelle (mm)

$L = 300 + 25T + 0.05T^3$

T : température moyenne annuelle (°C).

P = 801.17 mm

L = 963

T = 16.9 °C

I.9.2.2 Méthode du Bilan Hydrique de THORNTWAITE

Le calcul du bilan hydrique permet de qualifier les transferts d'eau issues des précipitations, et convient de caractériser un sol du point de vue sècheresse ou humidité.

Cette méthode du bilan, établi mois par mois, est basée sur la notion de réserve en eau facilement utilisable (notée par la suite RFU). On admet que le sol est capable de stocker une certaine quantité d'eau (la RFU) ; cette eau peut être reprise pour l'évaporation par l'intermédiaire des plantes. La quantité d'eau stockée dans la RFU est bornée par 0 (la RFU vide) et RFU max (capacité de la RFU qui est de l'ordre de 0 à 200 mm, suivant les sols et sous-sols considérés, avec une moyenne de l'ordre de 100 mm).

Le bilan hydrologique établi mensuellement selon la méthode de C.W. THORNTWAITE (Tableau) a l'avantage d'estimer pour chaque mois: l'évapotranspiration réelle (ETR), la réserve facilement utilisable (RFU), le déficit agricole (Da) et l'excédent (Ex).

Chapitre 2 : Hydro climatologie.

Mois	S	O	N	D	J	F	M	A	M	J	J	A	Année
T(°C)	22,3	18,3	12,3	8,8	8,4	7,9	10,8	14,5	18	23,1	26,9	26,6	16,5
P (mm)	42,1	46,7	90,1	109,2	79,9	96,2	88,7	57,2	36,2	14,4	1,7	5,5	667,9
ETPc (mm)	104	68,9	31	16,8	16,5	13,6	28,8	52,8	83,5	130,5	173,6	158,9	878,9
P- ETPc (mm)	- 61,9	- 22,2	59,1	92,4	63,4	82,6	59,9	4,4	- 47,3	- 116,1	- 171,9	- 153,4	
RFU (mm)	0	0	59,1	100	100	100	100	100	52,7	0	0	0	
ETR (mm)	42,1	46,7	31	16,8	16,5	13,6	28,8	52,8	83,5	67,1	1,7	5,5	406,1
DA (mm)	61,9	22,2	0	0	0	0	0	0	0	63,4	171,9	153,4	472,8
EX (mm)	0	0	0	51,5	63,4	82,6	59,9	4,4	0	0	0	0	261,8

Tableau 3: Bilan d'eau selon Thornthwaite pour la station de CONSTANTINE.

Si : $P > ETP \Rightarrow ETR = ETP$

L'excédent ($P - ETP$), est affecté en premier lieu à la RFU. Une fois la RFU est complète, il sera affecté à l'écoulement Q.

Si : $P < ETP \Rightarrow$ toute la pluie sera évaporée et on prend à la RFU (jusqu'à la vider) l'eau nécessaire pour satisfaire l'ETR, soit :

$$ETR = P + \min(RFU, ETP - P).$$

$$RFU = 0 \text{ ou } RFU + P - ETP$$

Si : $RFU = 0$, la quantité ($Da = ETP - ETR$) représente le déficit agricole, qui est la quantité d'eau qu'il faut apporter aux plantes pour qu'elles ne souffrent pas de la sécheresse.

Pour commencer à établir le bilan, on doit tenir en compte du raisonnement suivant :

Si la RFU doit être pleine un jour, ce sera à la fin de la période durant laquelle on a pu la remplir, c'est-à-dire à la fin du dernier mois où $P > ETP$.

Si la RFU doit être vide un jour, ce sera à la fin de la période durant laquelle, on a pu la vider, c'est-à-dire à la fin du dernier mois où $P < ETP$.

Chapitre 2 : Hydro climatologie.

I.9.3 Estimation du bilan d'eau :

Le bilan d'eau peut être estimé à partir de l'expression générale du bilan hydrologique qui exprime l'égalité des apports et des pertes :

$$P = ETR + R + I + (\pm \Delta W)$$

$$714.2 = 451 + 151.63 + 111.57$$

Avec:

P: précipitation moyenne annuelle en (mm);

ETR : Evapotranspiration réelle en (mm) ;

R : La lame d'eau ruisselée en (mm) ;

I : L'infiltration en (mm) ;

ΔW : La variation des réserves d'eau en (mm), considéré comme négligeable

I.10 Ruissellement

Il s'agit ici de l'écoulement de surface provenant de l'excédent du bilan hydrique. Et non pas de celui provenant des sources, forages ou drainage des nappes phréatique.

- Méthode de Thorntwaite : Le bilan hydrique (Thorntwaite), donne une valeur approximative du ruissellement. En admettant que cette valeur représente la moitié de l'excédent,

- Méthode de Tixeront-Berkaloff: Cette formule est utilisée pour le calcul du ruissellement surtout en pays arides et se définit comme suit :

$$R = \frac{P^3}{3E^2}$$

R : ruissellement en (m)

P : précipitations annuelles en (m)

E : évapotranspiration potentielle annuelle moyenne en (m).

I.10.1 Formule de FERZI, 1979 (en Tunisie)

D'après les observations des huit bassins tunisiens, FERZI (1979)1 avait établi une formule Empirique valable en climat aride. La formule relie la lame d'eau ruisselée à la pluviométrie moyenne et la pente moyenne du bassin.

$$L_r = 0.017 * p * \sqrt{IG}$$

Lr: Lame ruisselée moyenne annuelle en mm.

P : Pluie moyenne annuelle en mm.

IG : Pente moyenne du bassin en m/Km.

I.11 Infiltration :

Plusieurs auteurs ont donné des valeurs du coefficient d'infiltration sur différents massifs carbonatés. Néanmoins ces valeurs présentent une grande disparité. Ce ci est dû à plusieurs paramètres, voir les conditions climatiques, ruissellement, végétation, relief.

$$I = P - (ETR + R)$$

Où :

I : L'infiltration en (*mm*) ;

P: précipitation moyenne annuelle en (*mm*);

ETR : Evapotranspiration réelle en (*mm*) ;

R : La lame d'eau ruisselée en (*mm*) ;

I.12 Hydrologie :

La région de Constantine est caractérisée par un réseau hydrographique relativement dense, dont la ville de Constantine elle-même est le point de confluence de deux principaux cours d'eau. Oued Bou Merzoug (de direction N-S en amont puis devient NW-SE en aval) et Oued Rhumel (direction varie le long de son parcours) et qui traverse les gorges de Constantine. Le ravinement intense de la région forme les affluents des deux Oueds, parmi ces affluents, on trouve Oueds Athmènia, Seguin, Ziad et Smendou qui convergent tous vers Oued Rhumel, et Oueds El Klab, Melah, Berda et Oued Hamimine qui affluent Oued Bou Merzoug.

Ce qu'il faut noter c'est la faiblesse de leurs débits, voir l'assèchement en période des grandes chaleurs. Par contre en période pluvieuse ; la violence des pluies fait souvent que le débit des Oueds atteint des pointes record, pour retomber quelques jours plus tard à un niveau assez bas.

I.13 Conclusion :

Le climat de la région de Constantine est tempéré confirmé par le calcul de l'indice d'aridité de MARTONNE ($I = 25.20$ Climat est tempéré) et caractérisé par deux saisons, l'une humide et froide et l'autre sèche et chaude.

Chapitre 3 : Etude géotechnique et reconnaissance de sol.

I.14 Introduction

Les sols sont des matériaux naturels utilisés pour supporter les ouvrages (fondations superficielles et profondes), sont supportés par des ouvrages (murs de soutènement, rideaux de palplanches) et sont des ouvrages (remblais, digues, barrages). De là, une nouvelle science est née au vingtième siècle c'est la mécanique des sols. L'objet de la mécanique des sols est de déterminer par tous les moyens appropriés les qualités des sols sous-jacents et leurs caractéristiques mécaniques la portance et l'épaisseur des différentes couches rencontrées les tassements sous l'action des surcharges amenées par les constructions. Une campagne de reconnaissance des sols doit toujours précéder l'étude de tout projet. Elle peut intervenir au stade de pré-étude ou au cours de l'avancement du projet. Ses objectifs sont multiples :

rechercher les terrains adaptés à l'implantation d'ouvrages importants, d'infrastructures routières ou ferrées, dans une région déterminée ;

l'ébauche d'un schéma directeur ou d'un plan de masse en tenant compte des aléas des sols;

Définir le maillage des points de sondage, d'autant plus fin que l'étude doit être précise ou que le sol est hétérogène ;

La qualité des renseignements recherchés : enquêtes, essais in-situ ou essais au laboratoire ; la précision demandée, plus grande en phase d'étude d'exécution.

Il est recommandé d'effectuer une analyse des sols le plus en amont possible des études.

I.15 Des objectifs essentiels à la qualité des études :

- préciser la nature et la structure du sous-sol, en particulier pour délimiter et caractériser les principales zones compressibles,
- mesurer les caractéristiques géotechniques des terrains traversés, en particulier pour le pré dimensionnement des ouvrages,
- identifier les aléas majeurs liés à la géologie et à l'hydrogéologie locales,
- apprécier les conditions de réutilisation des matériaux dans la définition des mouvements de terre (déblai, remblai).

I.16 LES METHODES GEOPHYSIQUES

I.16.1 Définitions et domaines d'application méthodes géophysiques

Les méthodes géophysiques sont des méthodes de reconnaissance non destructives mises en œuvre à partir de la surface du sol dans le but de mesurer les valeurs et les variations de certains paramètres physiques tels que :

- Résistivité électrique du sous-sol,
- Célérité des ondes de compression.

On a proposant les deux méthodes suivantes :

- Méthode de reconnaissance par résistivité électrique,
- Méthode de reconnaissance par sismique réfraction.

I.16.1.1 Méthode de reconnaissance par résistivité électrique.

Les méthodes de reconnaissance par mesures de résistivité consistent à mesurer la variation de la résistivité électrique à l'intérieur du sous-sol.

La mesure se fait au moyen d'un quadripôle noté AB, MN constitué par quatre électrodes alignées et plantées dans le sol. Par les électrodes A et B, on injecte un courant continu d'intensité I et on mesure la différence de potentiel VM — VN qui apparaît entre les électrodes M et N. La résistivité apparente au point O, milieu de MN, est donnée par la formule :

$$\rho = k. \frac{VM - VN}{I}$$

Où:

K : a la dimension d'une longueur et dépend de la géométrie du dispositif,

P : est la résistivité du terrain homogène qui engendre la même différence de potentiel entre M et N quand on injecte i a même intensité entre A et B.

Il existe deux principales méthodes de mesure : le sondage électrique et le traîné de résistivité.

I.16.1.1.1 Le sondage électrique

I.16.1.1.1.1 Principe de la mesure :

Pour Faire un sondage électrique dans un point O. Consiste à mesurer la résistivité apparente du sous-sol en donnant au dispositif ABMN centré en O une taille croissante dans la même direction en conservant les proportions du dispositif.

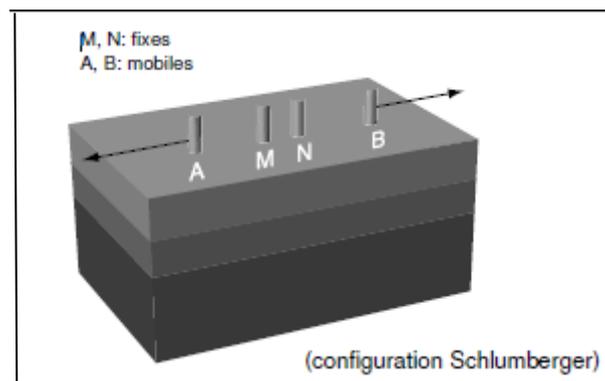


Figure 13: Illustration du principe de mise en œuvre d'un sondage.

L'interprétation de ces courbes n'est pratiquement possible que si :

- (1) les résistivités des différentes couches sont bien contrastées.
- (2) les couches ont une extension verticale et horizontale assez importante.
- (3) les terrains sont stratifiés horizontalement ou sub-horizontalement.

I.16.1.1.1.2 Présentation des mesures

La méthode la plus efficace d'interprétation d'un modèle consiste en l'utilisation d'algorithmes d'inversion qui, à partir d'un modèle grossier de sous-sol et connaissant l'équation du potentiel I à la surface pour un système d'électrodes donne, vont restituer un modèle dont la réponse s'ajuste (statistiquement) le mieux possible à la courbe mesurée. Le calcul d'inversion se fait évidemment sur ordinateur.

On utilisera la bonne vieille méthode de nos ancêtres : les abaques. Les abaques sont une série de courbes types calculées pour divers contrastes de résistivité et épaisseur pour les différentes couches du sol. L'interprétation consiste à trouver la courbe qui s'ajuste le mieux à la courbe mesurée et on obtient ainsi les paramètres du sous-sol.

Sur ce graphique, sont notamment précisés :

- le point où le sondage a été effectué,
- le type de dispositif utilisé,
- l'orientation du dispositif,
- la référence aux abaques ou aux programmes de calcul utilisés pour l'interprétation.

I.16.1.1.2 Le traîné de résistivité

I.16.1.1.2.1 Principe de la mesure

Pour Faire un traîné électrique consiste à mesurer la résistivité apparente du sous-sol en divers points de la surface du sol en conservant en taille le dispositif de mesure ABMN et en l'orientant selon des directions déterminées.

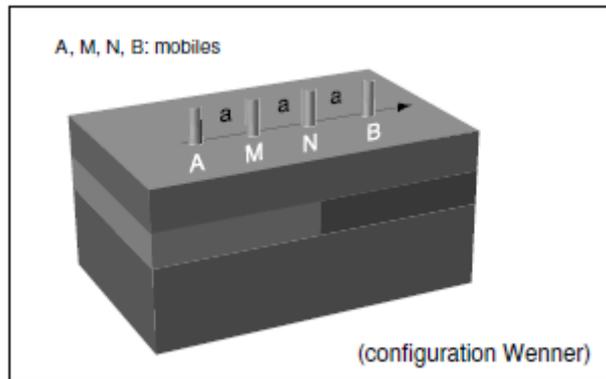


Figure 14: Illustration du principe de mise en œuvre d'un profil.

I.16.1.1.2.2 Présentation des résultats

La présentation des résultats comprend :

- un tableau indiquant les coordonnées de chaque point de mesure et la valeur des résistivités apparentes en ce point pour chaque taille du dispositif.
- les cartes de résistivité obtenues pour les différentes tailles du dispositif.

Les hypothèses utilisées pour l'interprétation des mesures doivent être précisées : en particulier, on doit donner les éléments ayant servi à l'étalonnage (sondages carottés, tranchées, affleurements, etc.).

I.16.1.1.2.3 Domaine d'utilisation

Dans le cas où il est possible d'interpréter quantitativement un sondage électrique, on obtient une description de l'évolution de la résistivité apparente du sous-sol avec la profondeur au droit du point de mesure. Sur la base d'étalonnages, le sondage électrique peut permettre d'accéder à une connaissance schématique de la structure du sous-sol.

Par ailleurs, il permet aussi d'étalonner et de choisir les paramètres d'un dispositif de traîné de résistivité.

Le traîné de résistivité permet de déceler les variations latérales dans la structure du sous-sol dans un volume dépendant essentiellement de la taille choisie pour le dispositif de traîné.

Chapitre3 : Etude géotechnique et reconnaissance de sol.

I.16.1.2 Méthode de reconnaissance par sismique réfraction :

Les méthodes sismiques sont des techniques d'imagerie basées sur l'étude de la propagation des ondes sismiques. Les ondes sismiques sont de nature mécanique. On peut dire d'une onde que :

- c'est une perturbation du milieu, qui se propage dans l'espace.
- la propagation est fonction des propriétés physiques du milieu.

Reconnaissance par sismique réfraction consiste à mesurer le temps de propagation dans le sol des ondes longitudinales entre une source et des récepteurs. La source de l'ébranlement est appelée source sismique.

On appelle installation l'implantation des récepteurs.

On appelle dispositif l'implantation de la source par rapport à l'installation.

La longueur du dispositif est la distance entre la source et le récepteur le plus éloigné.

La source constitue l'origine du dispositif.

I.16.1.2.1 Principe de la reconnaissance :

Le dispositif le plus souvent utilisé est le dispositif linéaire comprenant une source et «n» récepteurs alignés.

Le premier étant installé en A et le dernier en B, les dispositifs classiques sont :

- le tir direct : la source est placée sur la ligne de tir AB au voisinage de A,
- le tir inverse : la source est placée sur la ligne de tir AB au voisinage de B,
- le tir au centre : la source est placée au milieu de la ligne de tir AB

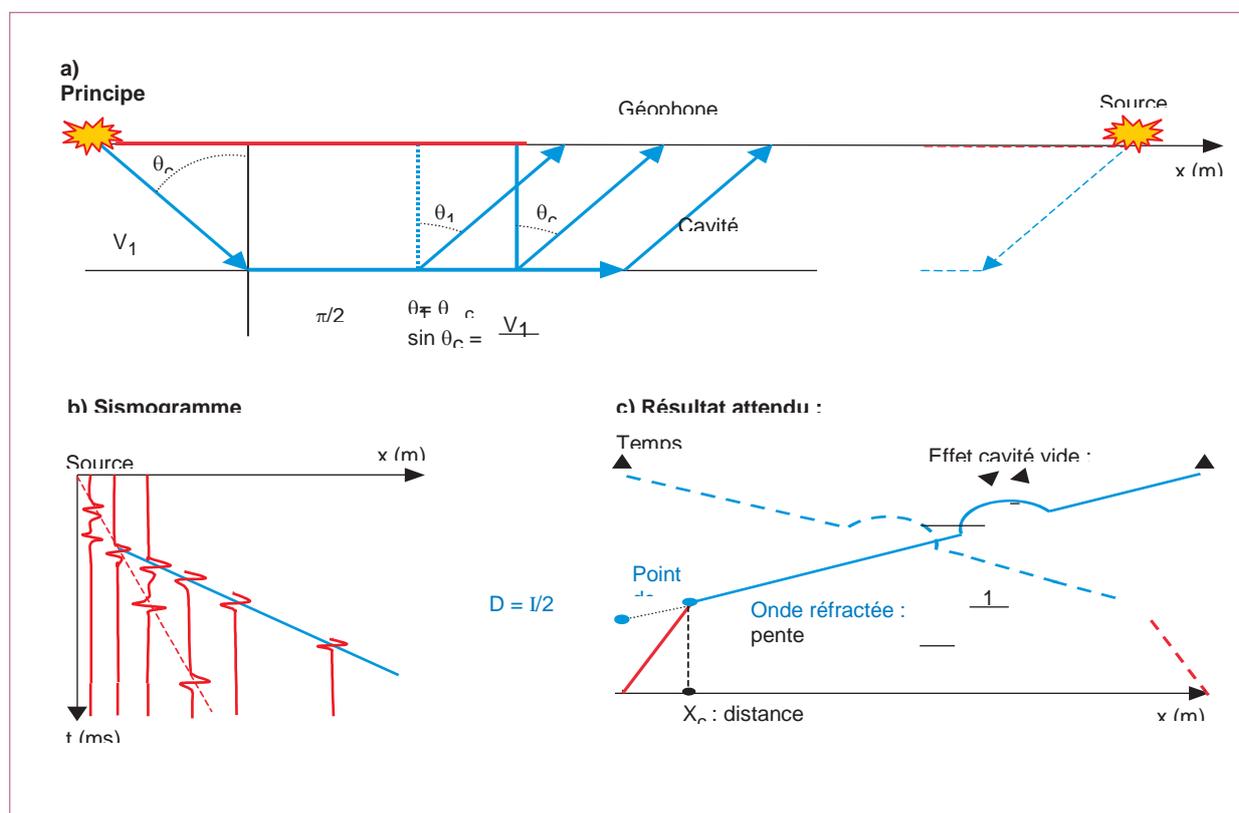


Figure 15 : méthode sismique réfraction.

Chapitre3 : Etude géotechnique et reconnaissance de sol.

- a. Principe de la réfraction des ondes sismiques avec représentation des tirs en offset direct et inverse.
- b. Représentation qualitative d'un sismogramme brut.
- c. Dromochronique.

La présence de cavités peut être révélée par un sur délai, l'éventuel déport constaté (c) est fonction de la profondeur de la cavité.

I.16.1.2.2 Présentation des résultats

La présentation des résultats comprend :

- une description sommaire du matériel mis en œuvre,
- un plan des dispositifs,
- pour chaque installation repérée sur le plan, le diagramme temps-distance (dromochronique) pour chacun des dispositifs avec les temps de propagation correspondant à chaque récepteur,
- les hypothèses utilisées pour l'interprétation des mesures doivent être précisées.

En utilisant cette méthode dans la géologie locale permettra aux ondes sismiques d'aller se réfracter sur un horizon situé sous la cavité recherchée

La sismique réfraction ne s'applique que pour des milieux tabulaires où le contraste des vitesses entre couches croît avec la profondeur. La détection de cavité est possible par exemple dans le cas de carrières exploitées en banc, pour des profondeurs allant de vingt à trente mètres. Le principal indice de détection est un retard dans les temps d'arrivée.

I.17 LES ESSAIS «IN SITU» ET LES SONDAGES.

I.17.1 Pénétromètre dynamique :

Cet appareil dont le principe est montré figure 6 permet :

- la mesure de la résistance dynamique à l'enfoncement d'un pieu battu ;
- l'estimation de la résistance de pointe conventionnelle par la formule dite des Hollandais :

$$q = g.H.M^2 / A.\delta.(M+P)$$

M: masse du mouton.

P: masse pointe + tiges.

δ : Enfoncement moyen par coup.

A: section de la pointe.

H: hauteur de chute du mouton.

$g = 9,81 \text{ m/s}^2$.

La valeur de résistance obtenue n'est pas utilisée pour vérifier la résistance d'une fondation mais donne une indication qualitative sur la nature des sols traversés.. En particulier l'essai permet facilement de repérer des passages différents, par exemple une couche plus compressible ou bien une couche graveleuse...Il est également utilisé pour apprécier le compactage de couches de chaussée ou le remblaiement de tranchées.

I.17.2 Pénétromètre statique :

Avec le pénétromètre statique, la pointe est enfoncée dans le sol à vitesse régulière. L'appareil permet la mesure de la résistance de pointe q_c et du frottement latéral f_s lors de l'enfoncement à vitesse lente et constante d'une pointe conique. Les résultats permettent de donner une indication sur la nature des sols traversés. La valeur de la résistance de pointe est utilisée pour le dimensionnement des fondations

L'essai permet la mesure de la Résistance du sol (*en quasi statique : Vitesse d'essai constante et contrôlée*) de la Pénétration, d'une Pointe et d'un manchon de frottement aux dimensions Normalisées.

L'essai est très adapté (beaucoup) dans les calculs de fondations profondes (type pieux).

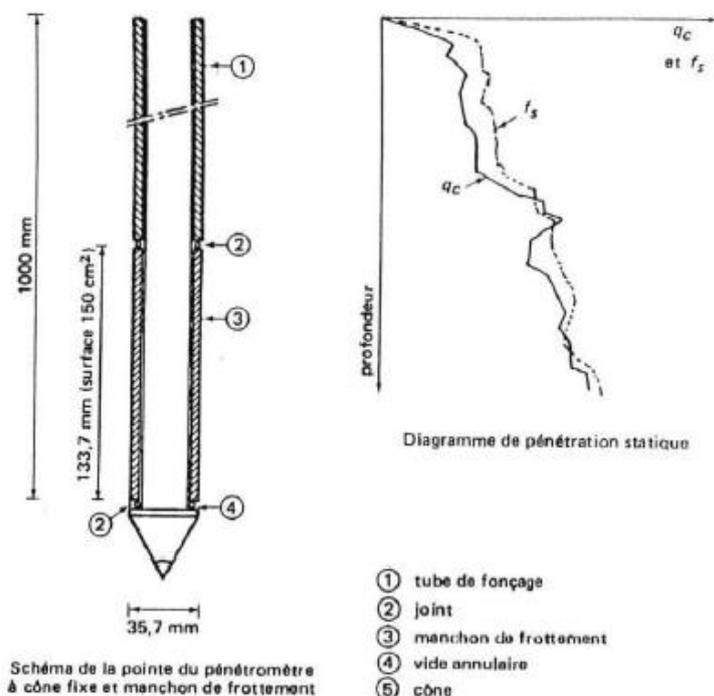


Figure 16: schéma de la pointe du pénétromètre à cône fixe et manchon de frottement

I.17.3 Pressiomètre :

Cet essai dû à Louis Ménard est réalisé à l'aide d'une sonde cylindrique dilatable descendue dans un forage à la profondeur voulue. La cellule de mesure et les deux cellules de garde sont gonflées par paliers successifs. Grâce aux cellules de garde, la pression exercée sur la tranche de sol investiguée peut être considérée comme uniforme. Le graphe de l'essai trace le volume d'eau injecté dans la cellule de mesure en fonction de la pression appliquée sur le sol. Lorsque la pression augmente, le sol est dans une phase pseudo-plastique au sein de laquelle est calculé le module pressiométriques :

$$EM = K.\Delta P/\Delta V$$

Où :

ΔP = palier de pression appliquée à la sonde.

ΔV = augmentation de volume de la sonde.

K est une constante liée à la géométrie de la sonde (homogène à un volume).

Puis au-delà de la pression dite de fluage (P_f), le sol entre dans le domaine plastique, jusqu'à ce que la déformation augmente très rapidement, pour une pression baptisée pression limite (Pl). Ces deux paramètres importants EM et Pl sont utilisés pour calculer le tassement ainsi que la contrainte de rupture d'une fondation superficielle ou profonde.

Le préssiomètre est également utilisé pour contrôler in situ l'amélioration d'un sol (compactage, consolidation dynamique, vibroflotation).

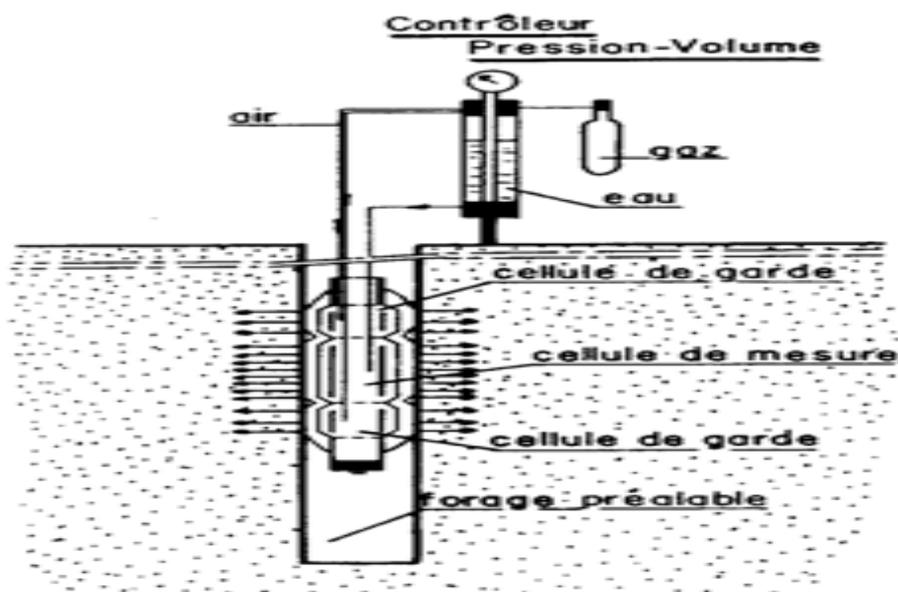


Figure 17 : schéma de l'essai Pressiomètre .

I.17.4 L` Essai de Pénétration au carottier (Standard pénétration test).

L'essai SPT est un essai permettant de déterminer la résistance à la pénétration dans les terrains d'un tube échantillonneur fendu, enfoncé par battage dans un forage, et d'obtenir des échantillons remaniés du sol pour examen et identification. Cet essai se fait avec un matériel standard et suivant un processus normalisé. Il doit être fait dans les conditions fixées par la norme européenne en vigueur ci-après.

La valeur SPT «N» est une valeur caractérisant conventionnellement la résistance à la pénétration dans les terrains à prédominance sableuse dans les conditions suivantes :

Chapitre3 : Etude géotechnique et reconnaissance de sol.

— cette valeur résulte d'un essai SPT effectué selon les règles de la norme avec un matériel répondant aux critères qu'elle définit ;

— l'essai SPT correspondant a été effectué au fond d'un forage dans un terrain aussi peu remanié que possible, et notamment en évitant toute remontée ou éboulement de sol entre la fin de la perforation et le début de l'essai, dans les conditions suivantes :

A la profondeur d'essai, on enfonce (au battage) le carottier de 45 cm, par passe de 15 cm.

On compte alors le nombre de coups composé de :

Soit **N1** : pour les 15 premiers cm.

N2 : pour les 15 suivants.

N3 pour la dernière tranche des 15 cm.

On appelle **N** : paramètre S.P.T à cette profondeur

$$N = N2+N3.$$

Généralement l'essai est arrêté dès que N atteint 50 coups (Sol très compact).

Puis sur un **LOG** (une coupe) de sondage on mentionne à chaque

Profondeur le paramètre « N » ainsi trouvée.

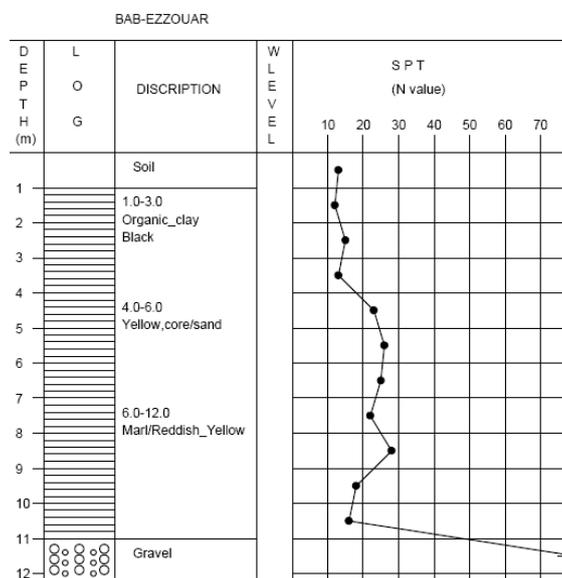


Figure 18: Graphe essai SPT.

I.18 LES ANALYSES ET LES ESSAIS EN LABORATOIRE.

1. Essais d'identification :

- Teneur en eau.
- Densité.
- Limite d'Atterberg.
- Analyse granulométrique et sédimentométrique.
- Valeur au bleu du sol.
- Equivalent de sable.
- La teneur en carbone.

2. Essais mécaniques :

- Essais de Cisaillement à la boîte (CU, CD et UU).
- Essais triaxial.
- Essai de Compression simple.
- Essai Œdométriques.

I.18.1 Essais d'identification :

Ces essais, généralement simples, sont destinés à décrire, et à identifier les sols, à les classer et à apprécier leur état.

I.18.1.1 Teneur en eau.

La teneur en eau est un paramètre d'état qui permet d'approcher certaines caractéristiques mécaniques et d'apprécier la consistance d'un sol fin.

C'est le rapport du poids d'eau que le sol contient au poids de ses éléments secs, après dessiccation à l'étuve à 105 C°.

$$W\% = \frac{\text{poids d'eau}}{\text{poids du sol sec}} * 100$$

$$\text{Poids d'eau} = (P.H+Tare) - (P.S+Tare)$$

$$\text{Poids sec} = (P.S+Tare) - (P.Tare)$$



Figure 19 : la pesée.

Remarque :

Le poids du sol sec est mesuré après avoir retiré l'échantillon de l'étuve à 105 C° resté dans celle-ci respectivement 24h.

I.18.1.2 Densité γ (Poids spécifique) :

- 1) Densité humide γ_h (Poids spécifique du sol humide) :

C'est le rapport du poids total d'une certaine quantité de sol à son volume apparent.

$$\gamma_h = \frac{W}{V}$$

- 2) Densité sèche γ_d (Poids spécifique du sol sec) :

C'est le rapport du poids de matériau sec contenu dans une certaine quantité de sol au volume de ce même sol.

$$\gamma_d = \frac{W}{V_{\text{sec}}}$$

Mais avant qu'on fasse ces calculs on doit faire les pesées suivantes :

Poids humide + paraffine, Poids humide après déparaffinage, Poids du matériau dans l'eau.

La densité est calculée en suivant les étapes suivantes :

Poids paraffine = (PH + Paraffine) – (Poids humide)

Volume brut = (PH + Paraffine) – (P. Matériau dans l'eau)

Volume paraffine = (Poids paraffine) / (Densité paraffine) \Leftrightarrow (Poids paraffine) / (0.9)

Volume net = (Volume brut) – (Volume paraffine)

Densité humide = P humide / Volume net

Densité sèche = $\frac{\text{densité humide}}{W+100} * 100$

On calcule aussi le degré de saturation **Sr** après qu'on calcule la teneur en eau de saturation **Ws** :

$$Sr = \frac{Ws}{W} * 100$$

I.18.1.3 Limite d'Atterberg (Norme NF P 94-051 et Norme NF P 94-052-1) :

En fonction de la teneur en eau, un sol remanié se présente suivant des consistances variables pour lesquelles on peut distinguer quatre états : liquide, plastique, solide avec retrait et solide sans retrait.

En réalité, le sol passe graduellement d'un état à l'autre et les frontières respectives ne sont définies que conventionnellement par les limites d'Atterberg.

Chapitre3 : Etude géotechnique et reconnaissance de sol.

Les limites d'Atterberg sont donc des teneurs en eau. Pour les obtenir, les essais sont effectués sur la fraction du matériau passant au **tamis de 0.40mm**.

Donc ces limites sont utilisées dans les classifications des sols et permettent d'estimer les propriétés mécaniques.

Leur connaissance permet (par corrélations) de présumer le comportement d'un sol donné (en fonction de la nature et de la quantité d'argiles qu'il contient) lorsqu'il est soumis à des sollicitations.

L'essai s'effectue en deux phases :

Limite de liquidité W_L : entre l'état liquide et l'état plastique. Elle se détermine à l'aide de l'appareil de Casagrande.

Limite de plasticité W_P : entre l'état plastique et l'état solide avec retrait. Par définition, la limite de plasticité est la teneur en eau au-dessous de laquelle il n'est plus possible de confectionner avec le sol des rouleaux de 3mm de diamètre sans qu'ils se rompent.

Limite de retrait W_R : est la teneur en eau juste suffisante pour remplir les vides du sol. Au moment où il atteint par séchage son volume minimal. La limite de retrait est peu utilisée en mécanique des sols.

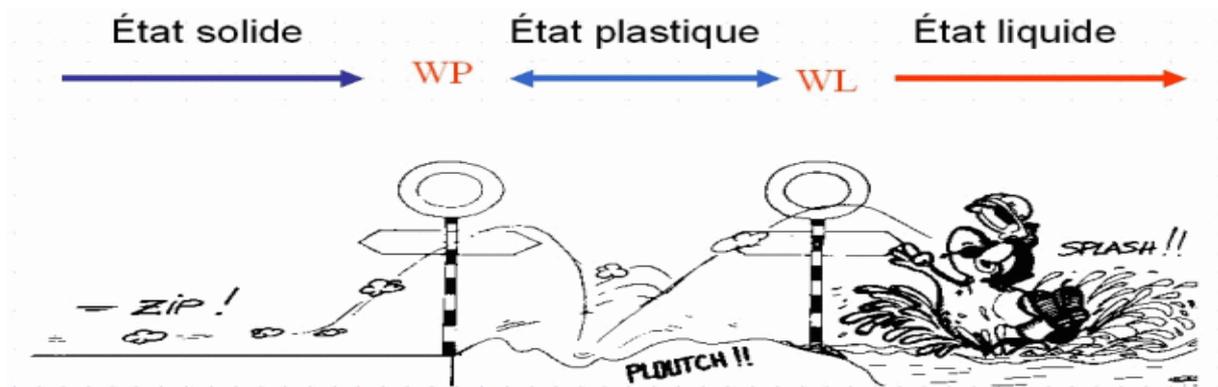


Figure 20 : schéma de l'état de sol

Comme on a dit l'essai s'effectue sur le mortier du sol (inférieur à $400\mu\text{m}$). Mais avant tamisage le matériau doit être imbibé pendant au moins 2h. Le tamisage s'effectue par voie humide.



Figure 21 : appairage de limite d'Atterberg.

Limite de liquidité : le sol est mélangé à une quantité d'eau. La pâte obtenue est placée dans une coupelle de 100mm de diamètre environ. On trace sur la pâte lissée une rainure normalisée avec un outil spécial. A l'aide d'une came, on fait subir une série de chocs à la coupelle. On observe en fin d'expérience le contact des deux lèvres de la rainure sur une longueur de 1cm. La limite de liquidité est la teneur en eau en % qui correspond à une fermeture en 25 chocs.



Figure 22 : réalisation de la limite de liquidité

Limite de plasticité : on mélange l'échantillon avec des quantités variables d'eau ; on façonne avec la pâte un rouleau de 6mm de diamètre pour une certaine de mm de longueur. Puis on atteint 3mm de diamètre en roulant (souvent avec les doigts). La limite de plasticité est la teneur en eau en % du rouleau qui se fissure et brise lorsqu'il atteint un diamètre de 3mm.



Figure 23: Limite de liquidité

Limite de liquidité W_L caractérise la transition entre l'état plastique et état liquide, c'est la teneur en eau pondérale, exprimée en % ; au-dessus de laquelle le sol s'écoule comme un liquide visqueux sous l'influence de son propre poids.

Teneur en eau pondérale est la masse d'eau(g) /la masse de sol sec (g).

Limite de plasticité W_P caractérise la transition entre l'état solide et l'état plastique, exprimée en % ; optimale pour travailler un sol et favoriser le compactage. En dessous de cette limite le sol est friable ou facilement travail able d'un pont de vue agronomique.

A partir des limites d'Atterberg, on peut calculer les indices suivants qui expriment **la sensibilité à l'eau du sol (I_P)** et sa **consistance(I_c)** par rapport à sa teneur en eau On détermine aussi la différence **I_P** qui définit l'entendue du domaine plastique cette différence est importante elle est appelée « **l'indice de plasticité**».

$$I_p = W_L - W_P$$

L'indice de plasticité permet de définir le degré de plasticité d'un sol :

Indice de plasticité	Degré de plasticité
$0 < I_p < 5$	Non plastique (l'essai perd sa signification dans cette zone de valeurs)
$5 < I_p < 15$	Peu plastique
$15 < I_p < 40$	plastique
$I_p > 40$	Très plastique

Tableau 4 : L'indice de plasticité

Chapitre3 : Etude géotechnique et reconnaissance de sol.

Ordres de grandeur

- Argile $I_p > 30$
- Argile limoneuse $20 < I_p < 30$
- Limon $10 < I_p < 20$
- Sable argileux $5 < I_p < 20$
- Sable limoneux $5 < I_p < 15$

Remarque : Plus l'indice de plasticité est élevé, plus le sol est sensible aux effets de gonflement par humidification (ou de retrait par dessiccation).

Indice de liquidité :

$$I_l = (W - W_p) / I_p$$

Indice de consistance :

Il s'agit d'un indicateur dérivé, il est défini par la relation suivante qui situe le sol à l'intérieur de la plage de plasticité.

$$I_c = (W_l - W)$$

Il permet d'apprécier la consistance des sols plastiques :

I_c	0	0.25	0.50	0.75	1	>1
consistance	Liquide	Pâteuse	Molle	Ferme	Très dure	Ferme

Tableau 5 Analyse granulométrique et sédimentométrique (Norme NF P 94-057) :

L'analyse granulométrique permet de mesurer la distribution dimensionnelle en poids des éléments d'un matériau. Elle comprend deux opérations :

Le tamisage : pour la distribution dimensionnelle en poids des particules de dimension supérieure ou égale à 80 microns.

La sédimentométrie (densimétrie) : pour la distribution dimensionnelle en poids des particules de dimension inférieure à 80 microns. La sédimentométrie est basée sur la loi de **Stokes** qui donne la vitesse limite d'une particule tombant sous l'action de la pesanteur dans un liquide visqueux.

L'analyse granulométrique se traduit par la courbe granulométrique. Cette courbe contribue à l'identification du matériau et permet de prévoir certaines de ses propriétés.

Refus sur un tamis : la quantité de matériau qui est retenue sur le tamis.

Chapitre3 : Etude géotechnique et reconnaissance de sol.

Tamisât(ou passant) : la quantité de matériau qui passe à travers le tamis.

L'analyse granulométrique par tamisage humide :

Elle consiste à séparer les différentes fractions et à les évaluer en pourcentage pondéraux de l'ensemble de l'échantillon%.

Chaque matériau est d'abord séché à l'air atmosphérique, puis étuvé à 105C° pendant 24h. Par la suite, 500g de matériau sont pesés, trempés dans l'eau pendant 24h, puis passés à travers une colonne de tamis : 2 et 0.8 mm, puis 500, 400, 200 et 100 µm. Après plusieurs lavages, les tamis contenant les résidus sont séchés à l'étuve pendant 24h à 105C°. Les différentes fractions sont calculées par pesée.

Pour finir, la proportion de particules inférieures à 100 µm est retenue pour effectuer l'analyse granulométrique par sédimentométrie.

Résultats :

Peser le refus du tamis ayant la plus grande maille ; Soit R1 la masse de ce refus.

Poursuivre la même opération avec tous les tamis de la colonne pour obtenir les masses des différents refus cumulés ...

Les masses des différents refus cumulés Ri sont rapportées à la masse totale de l'échantillon.

Les pourcentages de refus cumulés ainsi obtenus, sont inscrits sur la feuille d'essai. Le pourcentage des tamisât cumulés sera déduit.

On calcule le refus pour chaque tamis en % :

$$\text{Refus cumulés en \%} = \frac{\text{poids des refus cumulés} \cdot 100}{\text{poids de l'échantillon}}$$

La courbe granulométrique :

Donc l'essai consiste à fractionner au moyen d'une série de tamis un matériau en plusieurs classes granulaires de tailles décroissantes. Les masses des différents refus et tamisât sont rapportées à la masse initiale du matériau. Les pourcentages ainsi obtenus sont exploités sous forme graphique qui appelée la courbe granulométrique.

- **en abscisse** : les dimensions des mailles, échelle logarithmique

- **en ordonnée** : les pourcentages sur une échelle arithmétique.

La courbe doit être tracée de manière continue

I.18.1.4 L'analyse granulométrique par sédimentométrie :

Cette analyse permet de déterminer le pourcentage de particules argileuses dans un matériau. Dans l'étude des sols, on désigne par argile la fraction de matériau comprenant des éléments de diamètres inférieurs à 2 μ , et séparés au cours de l'analyse mécanique.

Le principe de la sédimentométrie est basé sur la loi de Stokes qui mesure la vitesse de décantation des particules sphériques dans un milieu visqueux sous l'influence de la force de gravitation et de la résistance du milieu.

Interprétation :

La courbe granulométrie est tracée

Calcul du coefficient d'uniformité :

$$C_u = D_{60} / D_{10}$$

Si $C_u > 2$ → granulométrie étalée

Si $C_u < 2$ → granulométrie uniforme ou serrée

I.18.1.5 Valeur au bleu du sol (Norme NF P 94 068) :

L'essai au bleu de méthyle, également appelé « essai au bleu », est un essai utilisé en géotechnique pour évaluer la richesse en argile d'un sol en mesurant sa capacité d'adsorption de molécules de bleu de méthyle.

Le principe de cet essai repose sur les échanges ioniques entre les cations des argiles, facilement échangeables, et les cations de bleu de méthylène libérés lors de sa dissolution dans l'eau. Les particules argileuses ayant une grande surface spécifique ainsi qu'une capacité d'échange ionique importante, la présence de minéraux argileux pourra être mise en évidence par l'emploi de bleu de méthylène et par comparaison avec la surface spécifique interparticulaire mesurée au BET.

On peut calculer cette « valeur au bleu » par la formule :

$$VB = V_b / M_s$$

ou :

V_b : le volume total de bleu utilisé en ml

M_s : la masse sèche de fines de sol utilisé pour l'essai

On appelle valeur de bleu sols VBS la quantité en gramme de bleu de méthyle adsorbée par 100g de fraction 0/50mm d'un sol. Pour cet essai on travaille sur la fraction 0/5mm du matériau.

La fraction 0/5 de l'échantillon de sol à examiner est séparée par tamisage et si nécessaire par lavage. La proportion en poids de la fraction 0/5 est alors calculée.

Chapitre3 : Etude géotechnique et reconnaissance de sol.

Une masse humide de sol est préparée, de poids compris entre 30 et 60g pour un sol argileux et entre 60 et 120g pour un sol peu argileux.

Remarque : Dans notre sol on prend 40g.

D'après le Guide des Terrassements Routiers (GTR 92), six catégories de sol sont définies en France selon la valeur de VBS :

Valeur de bleu de méthylène (VBS)	Catégorie de sol
VBS < 0.1	Sol insensible à l'eau
$1.5 \leq \text{VBS} < 1.5$	Sol sablo limoneux, sensible à l'eau
$1.5 \leq \text{VBS} < 2.5$	Sol sablo argileux, peu plastique
$2.5 \leq \text{VBS} < 6$	Sol limoneux de plasticité moyenne
$6 \leq \text{VBS} < 8$	Sol argileux
VBS > 8	Sol très argileux

Tableau 6Equivalent de sable (Norme NF EN 933-8) :

L'équivalent de sable est un indicateur utilisé en géotechnique, caractérisant la propriété d'un sable ou d'un grave. Il indique la teneur en éléments fins, d'origine essentiellement argileuse, végétale ou organique à la surface des grains.

Ce terme désigne également l'essai qui permet de déterminer cet indicateur. On parle d'essai d'équivalent de sable piston ou bien d'essai d'équivalent de sable.

L'essai doit être réalisé sur la fraction 0/2 mm à une teneur en humidité inférieure à 2% et à une température de 23°C°. Étant la teneur en humidité du sable (pourcentage en masse sèche), la masse de chaque éprouvette doit être égale à en g :

$$m = \frac{120 * (100 + w)}{100}$$

L'équivalent de sable est donné par la formule suivante :

$$SE = 100 * \frac{h2}{h1}$$

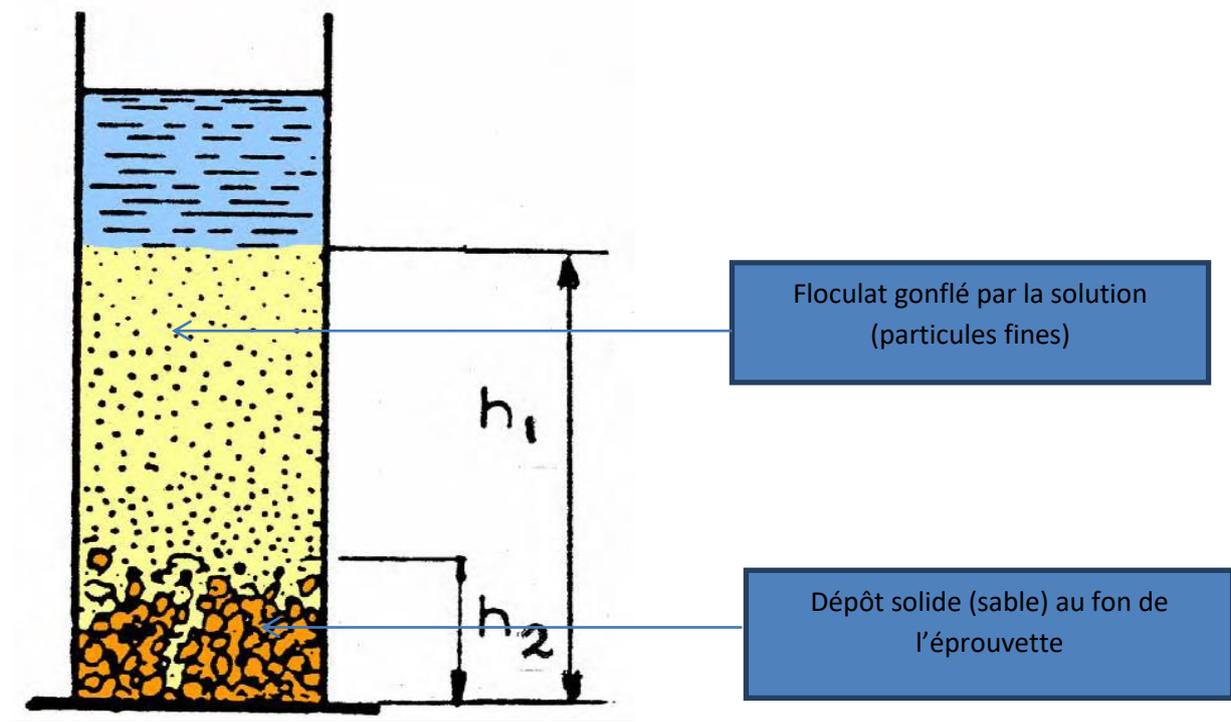


Figure 24: équivalente de sable.

I.18.2 Essai mécanique :

La résistance des sols mesurée expérimentalement et les théories de rupture permettent d'étudier la stabilité des fondations superficielles ou profondes, des ouvrages de soutènement, des remblais, des talus naturels ou de déblais, des barrages en terre... etc.

I.18.2.1 Essai de cisaillement :

Il existe plusieurs essais plus ou moins complexes, pour déterminer la résistance au cisaillement des sols : compression simple, compression triaxiale et cisaillement à la boîte.

Les deux essais : cisaillement direct et compression triaxiale sont les plus utilisés. Chaque essai comporte deux phases :

La première est l'application des contraintes normales.

La deuxième le cisaillement proprement dit.

Suivant que pendant l'une de l'autre de ces deux phases, on empêche tout drainage ou au contraire on laisse l'eau s'évacuer sans aucune pression, on distingue plusieurs types d'essais.

I.18.2.1.1 Essai de cisaillement CD consolidés drainés :

Essais dans lesquels il y a drainage, aussi bien pendant l'application de la contrainte normale que pendant l'application de la contrainte de cisaillement. La pression interstitielle doit être toujours nulle au cours du cisaillement.

I.18.2.1.2 Essai de cisaillement CU consolidés non drainés :

Essai dans lesquels il n'y a drainage que pendant la première phase : l'application des contraintes normales destinées à assurer la consolidation primaire totale de l'échantillon. Aucun drainage ne se produit pendant la phase de cisaillement.

I.18.2.1.3 Essai de cisaillement UU non consolidés non drainés :

Essai pendant lesquels aucun drainage de l'eau n'est possible durant les deux phases. La première phase constitue alors ce que l'on pourrait appeler « la remise sous contraintes ».

Critère de rupture :

Lorsqu'un système de forces est appliqué à un volume déterminé d'un sol, il se développe en général des contraintes de cisaillement qui entraînent des déformations du sol. Celles-ci peuvent être importantes le long de certaines surfaces que l'on appelle surfaces de glissement ou surface de rupture.

La résistance au cisaillement d'un sol est définie comme étant la contrainte de cisaillement dans le plan de la rupture, au moment de la rupture.

Sauf dans des cas particuliers on prendra comme résistance au cisaillement, le maximum de la contrainte de cisaillement.

I.18.3 Essai triaxial :

L'essai consiste à soumettre une éprouvette cylindrique de sol, d'élancement voisin de deux à un champ de contraintes uniforme qui a pour composantes :

- Une pression hydrostatique appliquée par l'intermédiaire d'un fluide (généralement de l'eau) remplissant la cellule.
- Une contrainte axiale ou déviatrice appliquée par l'intermédiaire d'un piston.

L'essai classique consiste à faire croître le déviateur jusqu'à rupture de l'éprouvette, la pression hydrostatique restant constante. On détermine les valeurs du déviateur à la rupture de 3 ou 4 éprouvettes identiques pour des pressions hydrostatiques différentes et on trace les cercles de **Mohr** correspondants.

Leur enveloppe est généralement une droite appelée droite intrinsèque, que l'on caractérise par les paramètres C (ordonnée à l'origine) et φ (angle avec l'horizontale).

Comme dans l'essai de cisaillement à la boîte, la pression de l'eau dans l'espace inter granulaire ou pression interstitielle u a une influence déterminante sur les paramètres C et φ , la résistance au cisaillement d'un sol dépendant essentiellement de la contrainte inter granulaire.

L'appareil triaxial permet de mesurer la pression interstitielle u au cours de l'essai et par suite de connaître grâce à la relation :

$$\sigma' = \sigma - u$$

La pression inter granulaire à chaque instant.

I.18.4 Essai de compression simple :

L'essai permet de mesurer la résistance à la rupture en compression simple R_c du sol.

L'éprouvette généralement cylindrique, d'élancement $2(H = 2 D)$ est placée entre les deux plateaux d'une presse et soumise à des charges croissantes jusqu'à rupture. La vitesse d'écrasement doit être suffisamment rapide (1.5 à 2 mm/mn) pour qu'aucun drainage ne puisse se produire pendant l'essai.

La relation :

$R_c = \frac{4P}{\pi D^2}$ donne en fonction de la charge appliquée P à la rupture, la valeur de la résistance à la compression simple R_c .

La cohésion non drainée des argiles saturées s'en déduit immédiatement ϕ_u étant nul.

$$C_u = \frac{R_c}{2} \text{ en bars}$$

L'échelle de consistance du sol à partir de R_c :

$R_c < 0.25$ bars	très molle
$0.25 < R_c < 0.50$ bars	molle
$0.50 < R_c < 1$ bars	mi- consistante
$1 < R_c < 2$ bars	consistante
$2 < R_c < 4$ bars	très consistante
$R_c > 4$ bars	extrêmement consistante

I.18.5 Essai oedométrique (Norme NF P 94-091) :

L'oedomètre :

L'oedomètre est un appareil de laboratoire utilisé en géotechnique.

Cet appareil permet de mesurer le tassement d'un échantillon de sol (intact de préférence) sous un effort donné, et son gonflement au cours du déchargement des efforts soumis auparavant.

L'opération de chargement et déchargement s'effectue par paliers et elle est chronométrée, afin d'en déterminer les propriétés mécaniques lors de calculs de mécanique des sols.



Figure 25: oedomètre.

L'essai est répété pour les valeurs croissantes de la charge en progression géométrique.

Pour chaque charge, l'indice des vides e en fin de consolidation est calculé et on trace la courbe ($e \text{ --- } \log \sigma'$) appelée courbe oedométrique.

Dans cette courbe on déduit les valeurs de :

- L'indice de compression C_c du sol, qui est donné par la pente de la partie droite de la courbe.
- La pression de pré consolidation σ'_c qui est donnée par une construction géométrique et qui correspond à la plus grande pression verticale supportée par le sol en place au cours de son « histoire ».

Avant de ça, on mesure l'indice des vides initiales e_0 et on calcule $le\Delta H$.

3. Courbe de consolidation, détermination de C_v

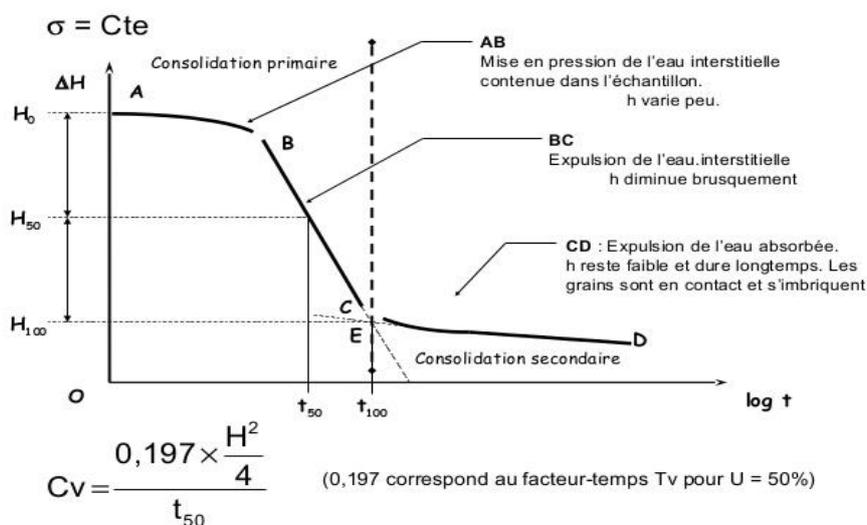


Figure 26: courbe oedométrique.

Étapes de calcul :

La teneur en eau (W%) initiale et finale.

La variation ΔH de la hauteur : $\Delta H = H_f - H_i$.

La hauteur totale : $H = H_S + W + \Delta H$.

La hauteur de (eau + vide) : $H - H_S$.

A la fin de chaque palier de chargement, on calcule la moyenne du tassement ou gonflement.

L'indice des vides à chaque fin de palier de chargement :

$$e = \frac{H - H_S - M}{H_S}$$

Classification des sols :

Sol tassant, très tassant ou non.

Sol peu gonflant, gonflant ou très gonflant

I.19 Conclusion :

Pour bonne étude et bonne reconnaissance de sol et de la profondeur de sol on a utilisé plusieurs méthodes de la recherche pour diminuer les risques et les dangers géotechniques.

On suit dans cette opération avec les recherches géophysiques et d'essais in situ (en place)

Et d'essais en laboratoire.

Chapitre 4 : Présentation de la méthode GPR

I.20 Le radar de sol :

Le radar de sol est un outil de prospection géophysique basé sur l'émission d'une onde électromagnétique et la réception de l'onde réfléchi, qui porte des informations sur les hétérogénéités du milieu sondé. La première publication parlant du radar de sol est celle de Stern (1929) qui présente des mesures radar pour sonder la profondeur d'un glacier autrichien. À la fin des années 50, un accident d'avion de l'U.S. Air Force au Groenland marque le départ des recherches sur l'imagerie du sous-sol à l'aide de la propagation des ondes électromagnétiques. Entre 1936-1971, 36 brevets sont déposés. En 1967, on envoie sur la lune un système assez similaire à celui proposé par Stern, dans l'expérience Apollo 17 (Simmons, 1974). En 2012, il y a eu plus de 2000 brevets déposés concernant le radar de sol, de nombreux fabricants, et de nombreuses sociétés de géophysique appliquée proposent des prospections radar de sol.

I.21 Le géo radar et la particularité du radar GPR à concevoir :

I.21.1 Propriétés électromagnétiques des sols :

Le comportement d'un sol sous illumination d'une onde électromagnétique est intrinsèquement lié à ses propriétés diélectriques et magnétiques. L'étude de ces propriétés permet de caractériser la réponse électromagnétique des sols géologiques. Cette approche théorique permet de rendre compte des propriétés des sols et sous-sols pour des applications géoradar en vue d'une modélisation plus détaillée de la nature du milieu ausculté.

Plusieurs méthodes de modélisations numériques ont été abordées en se basant sur les paramètres des sols qui sont principalement la permittivité, la conductivité et la perméabilité. Ces paramètres sont liés aux champs électromagnétiques à travers les équations de Maxwell. Grâce aux formulations de Faraday, Ampère et Gauss, Maxwell énonce les équations qui régissent la propagation des ondes électromagnétiques en fonction des caractéristiques du milieu de propagation.

I.21.1.1 Les équations de Maxwell :

Équation. 1

$$\vec{\nabla} \wedge \vec{E} = -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t}$$

Équation. 2

$$\vec{\nabla} \wedge \vec{H} = \frac{\partial \vec{D}}{\partial t} + \vec{J}$$

Équation. 3

$$\vec{\nabla} \cdot \vec{D} = \rho$$

Équation. 4

$$\vec{\nabla} \cdot \vec{B} = 0$$

Chapitre 4 : Présentation de la méthode GPR

Où

- \vec{E} désigne le vecteur du champ électrique (V/m),
- \vec{H} représente le vecteur du champ magnétique (A/m),
- \vec{D} est la densité de flux électrique (C/m),
- \vec{B} est l'induction magnétique (Tesla),
- \vec{J} représente la densité de courant (A/m²),
- $\vec{\nabla}$ désigne l'opérateur nabla,
- ρ désigne la densité de charge (C/m²),

En associant les propriétés diélectriques des matériaux aux équations de Maxwell, les relations suivantes sont obtenues.

Équation. 5

$$\vec{B} = \mu \vec{H}$$

Équation. 6

$$\vec{D} = \varepsilon \vec{E}$$

Équation. 7

$$\vec{J} = \sigma \vec{E}$$

- ε représente la permittivité constante du matériau (F/m),
- μ représente la perméabilité constante du matériau (H/m),
- σ désigne la conductivité constante du matériau (S/m).

Dans les équations (5)-(7) les propriétés du matériau sont prises en compte par de simples constantes. Ces équations ne sont valables que dans le cas idéal d'un milieu uniforme, homogène sans pertes

Dans la réalité, les matériaux naturels comportent des pertes et des caractéristiques dépendantes de la fréquence. En effet, les matériaux du sous-sol sont décrits comme des diélectriques caractérisés par des paramètres de conductivité et de constante diélectrique. Comme le souligne Nigel, J. Cassidy dans [3], le terme diélectrique désigne une classe de matériaux non conducteurs dont les charges électriques sont liées, et où les charges libres traversent la matière sous l'influence d'un champ électromagnétique en produisant une atténuation et une perte d'énergie. Tous les matériaux du sous-sol contiennent des charges libres, des électrons et des ions et dans certains cas, les matériaux présentent une conductivité élevée qui conduit à de forts niveaux de pertes d'énergie préjudiciables à la propagation des ondes du radar GPR.

I.21.1.2 Permittivité – ε :

La permittivité diélectrique est un paramètre physique décrivant la capacité d'un matériau à stocker et à libérer l'énergie électromagnétique. L'unité de la permittivité est le Farad. m⁻¹ (F. m⁻¹). Elle traduit l'aptitude d'un milieu à se polariser sous l'influence d'un champ électrique appliqué. En effet, les particules constituant le matériau tendent à changer de position

Chapitre 4 : Présentation de la méthode GPR

d'équilibre lorsqu'un champ électrique variable leur est appliqué. Ce phénomène de relaxation, de courte durée, se présente principalement sous 4 formes :

- La polarisation inter faciale ou polarisation de charges : une accumulation d'ions au niveau des interfaces dans un matériau hétérogène soumis à l'action d'un champ électrique,
- La polarisation dipolaire ou d'orientation : les molécules dipolaires soumises à un champ voient l'axe de leur dipôle s'aligner avec ce dernier,
- La polarisation ionique ou atomique : l'existence d'ions de signes contraires dans certains solides provoque des accumulations distinctes sous l'action d'un champ,
- La polarisation électronique : déformation du nuage électronique sous l'action d'un champ,

Les plages de fréquences correspondant à ces polarisations sont montrées sur la Figure

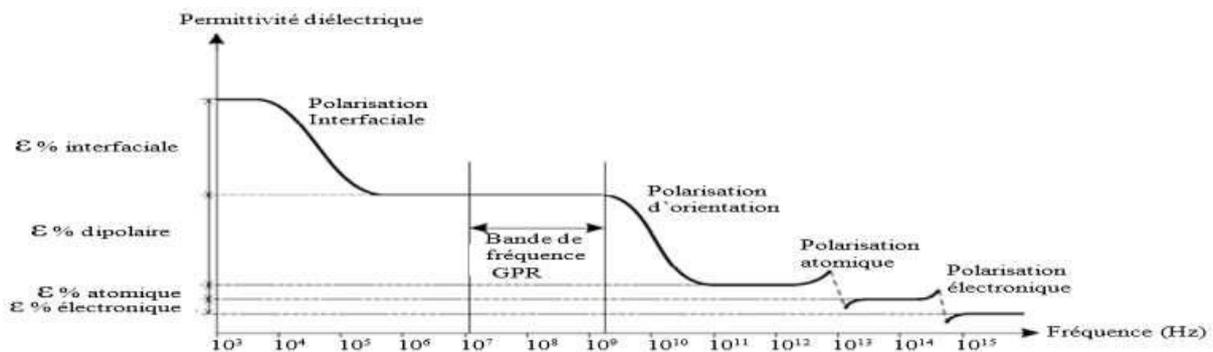


Figure 27: Les différents types de polarisations et leur effet sur l'évolution de la partie réelle de la permittivité sur l'ensemble du spectre électromagnétique (modifié d'après Guéguen and Palciauskas, 1992).

Il en résulte que le domaine fréquentiel utilisé pour les applications Radar à pénétration de sol est inclus dans la zone de polarisation dipolaire qui se caractérise par l'équation reliant la polarisation électrique \vec{P}_e à la densité de charge de polarisation ρ .

Équation. 8

$$\text{Div} \vec{P}_e = \rho$$

Dans le cas d'un matériau idéal isotrope décrit par $P_e (= \epsilon_0 \chi_e \vec{E})$ où χ_e représente la susceptibilité électrique (sans dimension), la densité de flux électrique \vec{D} qui caractérise les contributions externes et internes des charges sous influence d'un champ électrique à la polarisation est définie par :

Équation. 9

$$\vec{D} = \epsilon \vec{E} = \epsilon_0 \vec{E} + \vec{P}_e$$

Ou

$$\epsilon_0 = 1 / (36\pi \cdot 10^9) \text{ F/m,}$$

Chapitre 4 : Présentation de la méthode GPR

Ainsi, l'équation. 10 permet de définir la permittivité en fonction de la susceptibilité électrique :

Équation. 10

$$\varepsilon = \varepsilon_0 (1 + \chi_e)$$

La permittivité diélectrique est cependant usuellement définie par la permittivité relative ε_r qui est le rapport entre la permittivité du matériau et la permittivité du vide ε_0 .

Équation. 11

$$\varepsilon_r = \frac{\varepsilon}{\varepsilon_0} = 1 + \chi_e$$

En réalité, pour les différents matériaux diélectriques, la permittivité est un paramètre électromagnétique qui varie en fonction de la nature du sol, de son taux d'humidité, de sa composition granulaire ou calcaire, mais aussi en fonction de la fréquence. La quantité d'énergie accumulée lors de la polarisation est liée à la partie réelle de la permittivité diélectrique ε' alors que les pertes par dissipation sont liées à la partie imaginaire ε'' . Ainsi, la permittivité diélectrique peut aussi être définie comme étant un paramètre complexe s'écrivant sous la forme ci-dessous :

Équation. 12

$$\tilde{\varepsilon} = \varepsilon' - i\varepsilon''$$

Par ailleurs, une autre façon de quantifier les pertes dans le diélectrique consiste à définir la tangente de perte qui est le rapport entre la partie imaginaire et la partie réelle de la permittivité complexe.

Équation. 13

$$\tan \delta = \frac{\varepsilon''}{\varepsilon'}$$

En général, pour des milieux à pertes, la tangente de perte est très élevée en basses fréquences (par exemple pour de l'argile humide à 100MHz, la tangente est égale à 1.2 par rapport à du sable de faibles pertes de l'ordre de 0.1).

I.21.1.3 Conductivité - σ :

La conductivité permet de décrire la capacité d'un milieu à laisser mouvoir des charges sous l'influence d'un champ appliqué. Reliée à la densité de courant, la conductivité est une grandeur physique complexe. La conductivité d'un milieu, d'autant plus qu'il est meuble, dépend principalement de la présence de fluide conducteur et donc, par exemple, de sa saturation en eau ou de la salinité du fluide.

Équation. 14

$$\tilde{\sigma} = \sigma' + i\sigma''$$

L'application d'un champ variable, le transport et les pertes d'énergie se font en même temps, et il devient impossible de distinguer concrètement la part de la permittivité et de la conductivité dans le stockage d'énergie d'une part et dans les pertes d'autre part.

La résistivité ρ est l'inverse de la conductivité : $\rho = 1/\sigma$ et s'exprime en Ohm.m. Des valeurs de résistivité (donc aussi de conductivité) de divers matériaux et fluides en fonction de la salinité sont données par Schön (1996).

I.21.1.4 Perméabilité magnétique - μ

La perméabilité magnétique est une grandeur physique complexe correspondant à l'énergie stockée ou perdue suite aux phénomènes d'induction magnétique dans le matériau. La perméabilité magnétique traduit l'appartenance d'un matériau aux trois principales classes de matériaux magnétiques à savoir, diamagnétique (le matériau crée un moment induit dans le sens opposé du champ appliqué), paramagnétique (les moments existant dans le matériau tendent à s'aligner suivant le champ d'excitation) et ferromagnétique (matériau présentant des spins naturellement orientés dans la même direction). Dans les matériaux naturels, on constate de plus une dépendance fréquentielle de la perméabilité magnétique ce qui se manifeste par une aptitude à perdre de l'énergie magnétique lors de l'application du champ d'excitation.

Équation. 15

$$\tilde{\mu} = \mu' + i\mu''$$

La perméabilité μ des milieux sera considérée purement réelle et égale à la perméabilité du vide.

I.21.1.5 Vitesse de propagation :

Pour un matériau homogène, la vitesse de propagation est inversement proportionnelle à la racine carrée de la permittivité relative ϵ_r .

Équation. 26

$$vr = \frac{c}{\sqrt{\epsilon_r}}$$

Où c correspond la vitesse des ondes dans le vide.

La vitesse de propagation en fonction des caractéristiques du sol est montrée dans le Tableau 10.

Chapitre 4 : Présentation de la méthode GPR

Matériau	ϵ_r	(m/ns)	α (dB/m)	σ (mS/m)
Air	1	0.3	0	0
Sable	5 - 3	0,17 -0.13	0.01	0.01
Sable argileux	20 - 40	0.067 -0.047	0.03 - 0.3	0.1 - 1
Granite	4 -6	0.15 -0.12	0.01 -1	0.01 - 1
Argile	5 -40	0.13 -0.047	1 -300	2 -1000

Tableau 7: Valeurs typiques à 100MHz de la permittivité relative, de la vitesse de propagation, de l'atténuation et de la conductivité pour des sols dans le domaine du radarGPR

Ce tableau permet de montrer la dépendance de la vitesse de propagation à la permittivité relative contrairement au coefficient d'atténuation.

I.21.2 Base de fonctionnement et de prospection

Les différents radars GPR existant reposent sur le même principe de fonctionnement. L'antenne d'émission du dispositif est en contact avec le sol, et émet une Brève impulsion en direction du sol. L'onde électromagnétique générée se propage au sein d'un milieu de type diélectrique. Si un obstacle est rencontré, une onde réfléchie revient vers la surface du sol et est détectée par l'antenne de réception. Cette onde récupérée constitue une trace du sous-sol en un point précis et à un instant donné. L'utilisateur déplace le radar et à nouveau, une autre impulsion est générée. Elle permet d'obtenir une nouvelle trace en ce nouveau point de mesure. L'acquisition d'un ensemble de traces du sol suivant une direction de prospection rectiligne permet d'établir un B-scan (ou radar gramme) du milieu sondé. En fonction du type de cibles rencontrées (tuyaux, citernes enfouies, strates géologiques...).

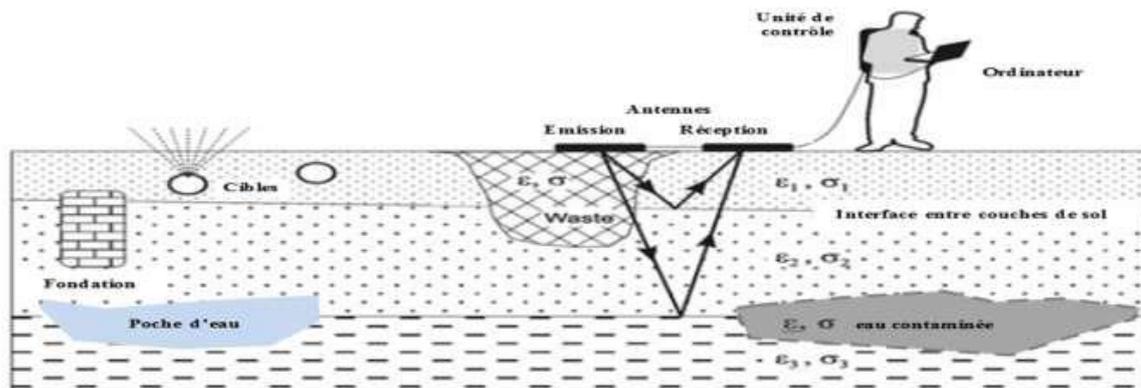


Figure 28: Schéma de principe d'un Radar GPR basique.

Les géo radars sont en général composés des éléments suivants:

- une unité de commande et de stockage des données (micro-ordinateur)

Chapitre 4 : Présentation de la méthode GPR

- une unité de contrôle, chargée de synchroniser et de servir d'interface entre les différents éléments
- une électronique d'émission, chargée de générer le courant qui est appliqué à l'antenne d'émission
- une électronique de réception, chargée d'amplifier et de numériser le signal mesuré Par l'antenne réceptrice.
- une antenne émettrice.
- une antenne réceptrice.

Les connexions entre électronique d'émission (ou de réception) et l'unité de contrôle se font par fibres optiques ou par câbles coaxiaux. Les électroniques d'émissions (ou de réception) sont en général connectées directement aux antennes. Pour la plupart des dispositifs existants, il existe plusieurs jeux d'antennes pouvant fonctionner avec les Mêmes électroniques d'émission (ou de réception) et la même unité de contrôle.

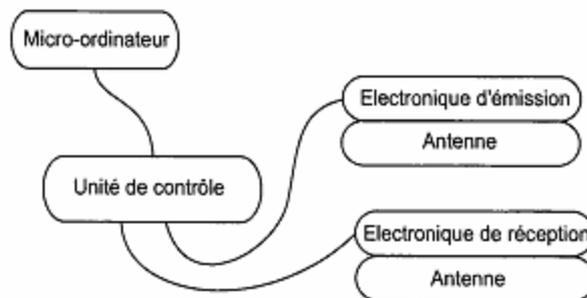


Figure 29: schéma de base éléments géo radar.

I.21.3 Profondeur d'investigation du géoradar :

La profondeur de pénétration des ondes électromagnétiques dans le sol dépend essentiellement de deux facteurs :

- la résistivité du terrain investigué, un sol conducteur étant plus atténuant,
- la fréquence des ondes EM.

On peut définir une profondeur d'investigation δ ("skin depth") comme la profondeur au-delà de laquelle l'amplitude des ondes chute au dessous de $1/e$ ($\ln e = 1$). Les valeurs de δ sont exprimées en fonction de la résistivité des terrains rencontrés.

Généralement difficile la détermination de la profondeur d'auscultation.

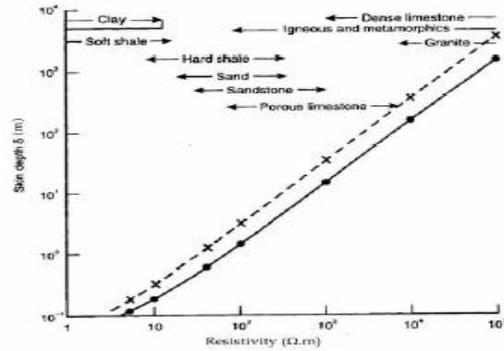


Figure 30: ‘Skin depth’ (en mètres) en fonction de la résistivité des matériaux géologiques (en Ohm.m) pour deux valeurs de permittivité relative du milieu : $\epsilon_r = 8$ (trait plein) et $\epsilon_r = 40$ (trait pointillé) (d’après Mc Cann ; 1988).

Le tableau illustre quelques ordres de grandeur de la résolution spatiale du géoradar en fonction de la profondeur de pénétration des ondes électromagnétiques.

Fréquence en (MHz)	Résolution spatiale $=\lambda/4$ (en m), pour $v=0.1$ m/ns	Pénétration (en m), pour $\rho = 100$ ohm.m
25	2.0	35
50	1.0	20
100	0.5	10
200	0.25	5
225	0.22	4
450	0.11	2
900	0.055	1

Tableau 1 : quelques ordres de grandeur de la résolution verticale en fonction de la profondeur de pénétration

I.21.4 La résolution spatiale

La capacité d’un radar GPR à distinguer différentes cibles proches est communément appelée la résolution en profondeur r [m]. et ce pour deux types de matériaux classiques : Une roche et un sol humide.

La résolution spatiale peut être calculée à partir de la formule suivante :

$$r = \frac{\lambda}{4} = \frac{v}{4f} = \frac{1}{4f\sqrt{\mu\epsilon}}$$

Chapitre 4 : Présentation de la méthode GPR

Où :

r est la résolution spatiale.

V est la vitesse de propagation des ondes électromagnétiques dans le milieu traversée.

f est la fréquence du signal transmit au sol.

μ est la perméabilité magnétique du milieu.

ϵ est la constante diélectrique du milieu.

λ est la longueur d'ondes des ondes radar.

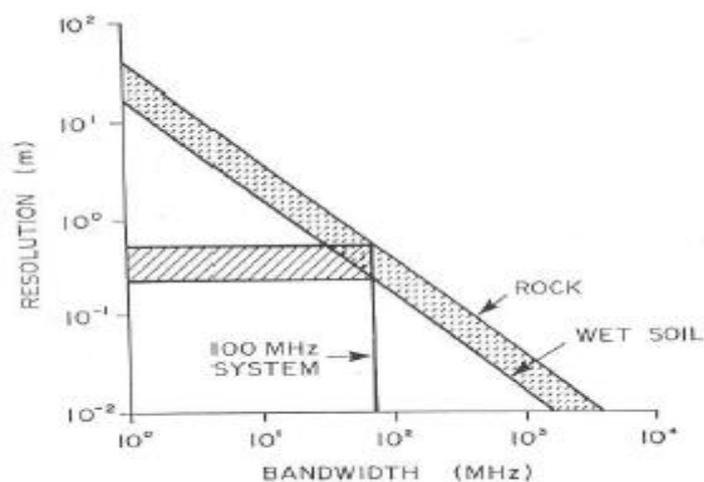


Figure 31: Résolution du géoradar en fonction de la fréquence (d'après Davis & Annan, 1989).

I.21.5 Le choix de la fréquence nominale

Doit être le mode de mise en œuvre du Géoradar, le choix de la fréquence nominale du dispositif utilisé, est un compromis entre résolution et distance d'investigation.

I.22 Les différents modes d'acquisition

I.22.1 Le mode réflexion

Dans la plupart des applications, les géoradars sont mis en œuvre en « mode réflexion ». On distingue les profils réflexion à offset (distance émetteur/récepteur) constant, des profils réflexion à offset variable. Dans le premier cas, les deux antennes, positionnées proches l'une de l'autre sont déplacées d'un même pas d'avancement sur la ligne de mesure. Le radargramme est obtenu en juxtaposant les différents signaux (ou « traces ») ainsi enregistrés (figure). Différentes ondes sont alors identifiables : - l'onde directe aérienne (uniquement dans le cas

Chapitre 4 : Présentation de la méthode GPR

des géoradar de surface). - l'onde directe souterraine. - des ondes réfléchies. - des ondes diffractées.

L'analyse du temps d'arrivée des ondes réfléchies et diffractées permet l'interprétation structurale des discontinuités du milieu.

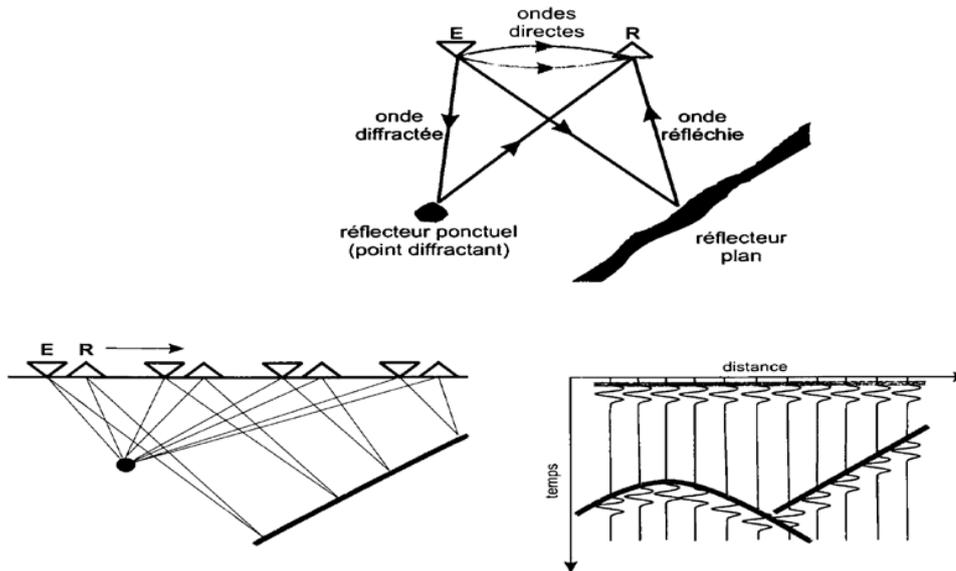


Figure 32 : Mise en oeuvre des géoradars en mode « réflexion à offset constant » (E : émetteur R : récepteur) Les deux antennes, positionnées proches l'une de l'autre sont déplacées d'un même pas d'avancement sur la ligne de mesure. Le radar gramme est obtenu en juxtaposant les différents signaux ainsi enregistrés.

I.22.2 Le mode transmission

Les profils en transmission ont pour objectif l'enregistrement d'ondes directes s'étant propagées dans un volume représentatif de roche. Ils peuvent par exemple être réalisés avec les dispositifs de surface lorsque la configuration de deux galeries souterraines le permet (figure 9). En utilisant des dispositifs de forage, ces acquisitions sont réalisées en positionnant les sondes dans deux puits différents. Il est alors possible d'interpréter le profil obtenu pour calculer une vitesse de propagation ou, plus généralement, pour évaluer l'effet de la propagation sur le signal. L'enregistrement d'un profil transmission unique est rare dans le cadre d'une investigation géophysique. Par contre, l'acquisition d'un grand nombre de profils transmission autour d'un volume de roche donné peut permettre de réaliser des tomographies.

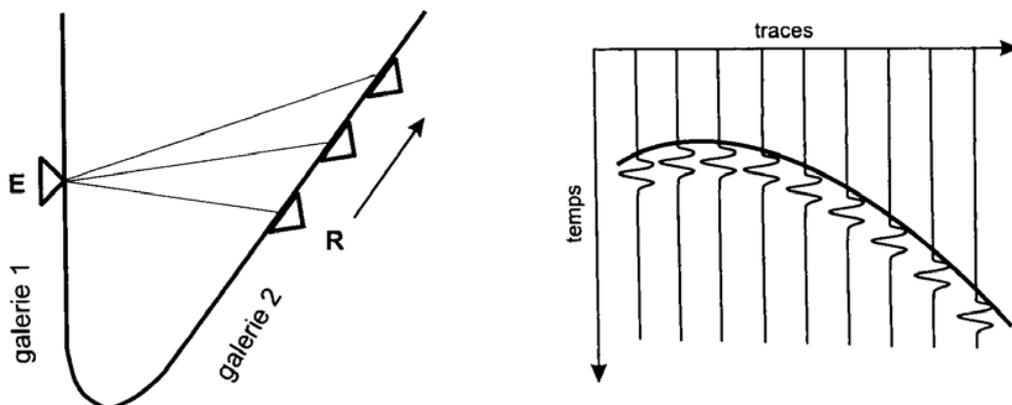


Figure 33 : Mise en œuvre des georadars en mode « transmission » (E : émetteur, R : récepteur).

I.23 Affichage et interprétation des données

L'objectif de la présentation des données GPR est de fournir un affichage des données traitées qui se rapproche étroitement d'une image du sous-sol, avec les anomalies associées aux objets d'intérêt situés dans leurs positions spatiales appropriées. L'affichage des données est au cœur de l'interprétation des données. En fait, produire un bon affichage fait partie intégrante de l'interprétation.

Il existe trois types d'affichage de données de surface, notamment:

- 1) une trace unidimensionnelle,
- 2) une section transversale bidimensionnelle.
- 3) un affichage tridimensionnel.

Les données de forage peuvent être affichées sous forme de coupe transversale bidimensionnelle ou traitées pour être affichées sous forme de tomogramme de vitesse. Une trace unidimensionnelle n'a pas beaucoup de valeur jusqu'à ce que plusieurs traces soient placées côte à côte pour produire une coupe transversale bidimensionnelle, ou placées dans une vue en bloc en trois dimensions.

La trace de wiggle (ou scan) est le bloc de construction de tous les écrans. Une seule trace peut être utilisée pour détecter des objets (et déterminer leur profondeur) sous un point de la surface. En remorquant l'antenne sur la surface et en enregistrant les traces à un espacement fixe, une section d'enregistrement des traces est obtenue. L'axe horizontal de la section d'enregistrement est la position de la surface et l'axe vertical est le temps de trajet aller-retour de l'onde électromagnétique. Une section d'enregistrement GPR est très similaire à l'affichage d'un sonogramme acoustique ou à l'affichage d'un sondeur. Deux types de coupes transversales de tracé de mouvement de tracés GPR sont illustrés à la figure. Les affichages de trace Wiggle sont une connexion naturelle à d'autres affichages courants utilisés en ingénierie (par exemple, et l'affichage de l'oscilloscope), mais il est souvent peu pratique d'afficher les nombreuses traces mesurées le long d'un transect GPR sous forme de trace ondulée. Par conséquent, les affichages à balayage sont devenus le mode normal de présentation des données bidimensionnelle pour les données GPR. Un affichage par balayage est obtenu en attribuant simplement une couleur (ou une variation d'intensité de couleur) aux plages d'amplitude sur la trace, comme le montre la Figure -a. Deux formes de données de numérisation sont illustrées à la figure, notamment: a) un affichage en niveaux de gris allant du noir au blanc, et b) un affichage de l'intensité des couleurs utilisant une seule couleur allant du blanc (ou noir) à la forme pure du Couleur.

Chapitre 4 : Présentation de la méthode GPR

Les affichages tridimensionnels sont fondamentalement des vues de bloc des traces GPR qui sont enregistrées à différentes positions sur la surface. Les données sont généralement enregistrées le long des lignes de profil, dans le cas d'un système d'enregistrement continu (voir Figure), ou à des points discrets de la surface dans un enregistrement en mode fixe. Dans les deux cas, les antennes doivent être orientées dans la même direction d'orientation de polarisation pour chaque position d'enregistrement si des antennes dipôles polarisées linéairement sont utilisées.

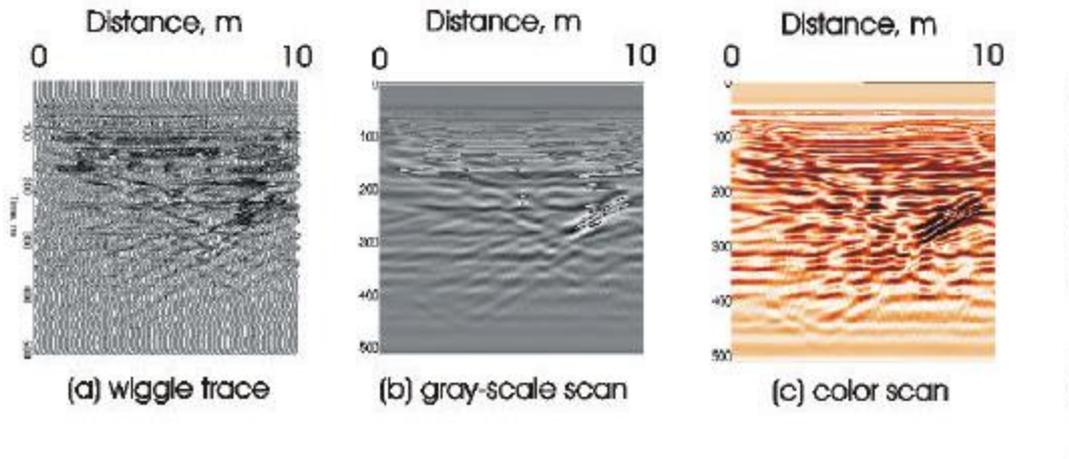


Figure 34: Les affichages de numérisation: a) la conversion d'un affichage de tracé ondulé en un affichage de balayage couleur, b) un affichage de balayage en échelle de gris, c) un affichage de balayage d'intensité des couleurs.

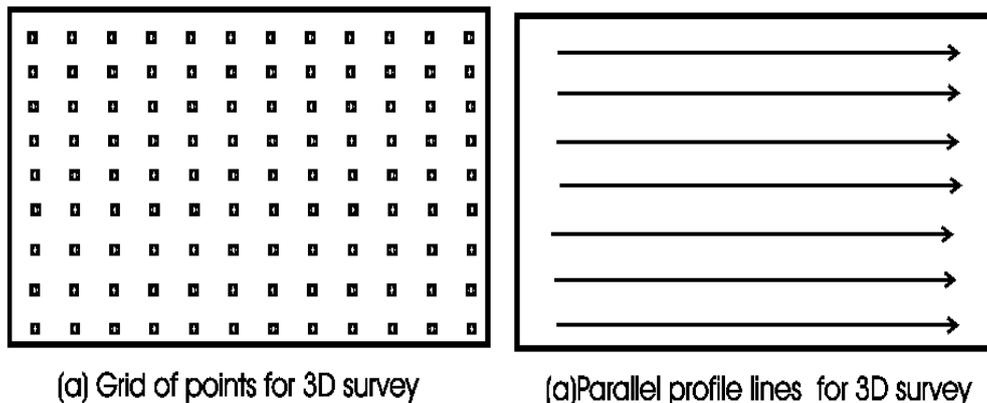


FIGURE. Grilles et lignes pour le mode fixe et le mode mobile pour les données tridimensionnelles des mesures. Notez que l'orientation de polarisation des antennes est la même pour chaque point de mesure sur la grille ou le long des lignes de profil.

La configuration d'antenne d'émission-réception typique pour un affichage tridimensionnel consiste à placer les antennes à la même distance l'une de l'autre pour chaque mesure sur la surface. Si les antennes sont placées le plus près possible l'une de l'autre pour chaque point de mesure, on parle alors de mode de mesure de radar tridimensionnel de pénétration du sol (GPR) d'antenne coïncidente. Les mesures peuvent être effectuées à l'aide d'antennes qui sont remorquées derrière un véhicule, ou en mode de fonctionnement à station fixe (trace fixe). Dans les deux cas, l'emplacement précis de chaque trace est essentiel pour produire des affichages 3D précis. Normalement, les vues de bloc 3D sont construites à partir de plusieurs lignes parallèles étroitement espacées, comme le montre la Figure déçue. Une fois les blocs

Chapitre 4 : Présentation de la méthode GPR

construits, ils peuvent être visualisés de différentes manières, y compris sous la forme d'un bloc solide ou de tranches de bloc, comme le montre la figure.

L'obtention d'un bon affichage tridimensionnel est une partie essentielle de l'interprétation des données GPR. Les cibles d'intérêt sont généralement plus faciles à identifier et à isoler sur des ensembles de données tridimensionnels que sur des lignes de profil bidimensionnelles conventionnelles. Simplifier l'image, en éliminant le bruit et l'encombrement sont les facteurs les plus importants pour optimiser l'interprétation. La simplification de l'image peut être obtenue en:

- 1) en attribuant soigneusement les gammes de couleurs d'amplitude,
- 2) en affichant une seule polarité du signal GPR,
- 3) en utilisant un nombre limité de couleurs,
- 4) en diminuant la taille de l'ensemble de données qui est affiché comme La complexité de la cible augmente,
- 5) affichant une plage de temps limitée (tranche de temps d'épaisseur finie)
- 6) sélectionnant soigneusement l'angle de vision. Une simplification supplémentaire de l'image dans le cas de cibles très complexes (ou multiples) peut également être obtenue en affichant uniquement les valeurs de crête (valeurs maximale et minimale) pour chaque trace. Les tranches de temps et les sections transversales d'épaisseur finie (oreiller) présentent de nombreux avantages par rapport aux tranches minces infinitésimales qui sont couramment utilisées pour interpréter les données GPR. Des exemples de sous-blocs qui peuvent aider à isoler les anomalies sont présentés dans la Figure.

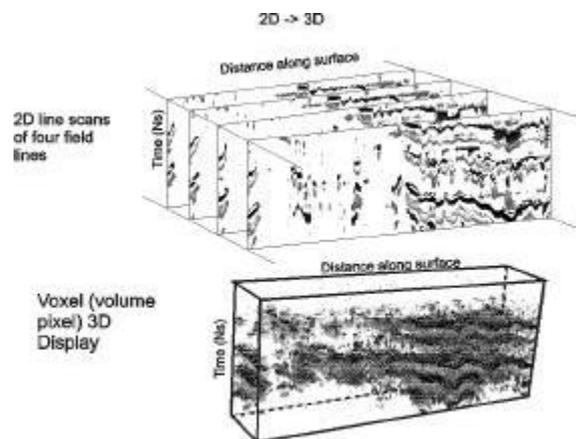


Figure 35: Le processus de construction d'un affichage tridimensionnel à partir d'une série de lignes bidimensionnelles: a) une série de lignes bidimensionnelles, et b) une vue de bloc tridimensionnelle.

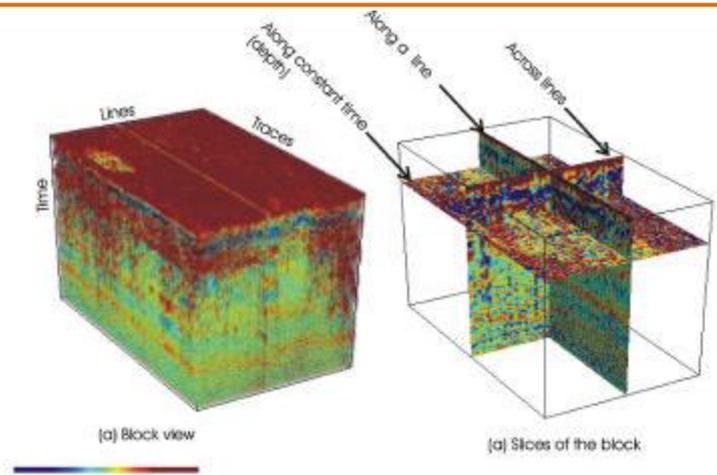


Figure 36 Dissection d'un bloc tridimensionnel en tranches.

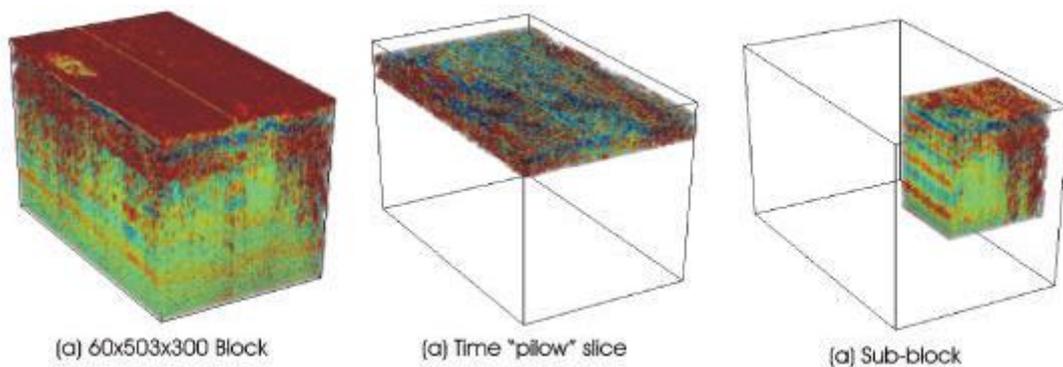


Figure 37: Vues de bloc et de sous-bloc pour se concentrer sur une région particulière à l'intérieur d'un bloc.

I.24 Avantage:

- C'est une méthode non destructive et sans travaux de préparation.
- Les mesures sont faciles à réaliser: traitement de surfaces importantes en peu de temps.
- Les mesures constituent une surveillance sans « zones d'ombre ».
- Le radar fournit des informations sur les épaisseurs et l'état des structures.

Les antennes peuvent être tractées manuellement mais aussi derrière un véhicule pour des linéaires plus importants.

Le radar est un appareil peu sensible à l'environnement de travail, c'est une méthode idéale pour les investigations en milieu urbain.

I.25 Les domaines d'applications de la méthode radar sont multiples :

- l'inspection des bétons et aciers
- la cartographie de réseaux enterrés
- l'inspection de routes
- l'inspection de ponts et ouvrages d'art
- l'inspection de voies de chemin de fer
- l'inspection de pistes d'aviation
- les investigations géologiques et géophysiques
- la mesure des épaisseurs de neige et glace
- l'archéologie
- la criminalistique
- l'environnement
- détection des minerais et exploitation

I.26 Exemple des résultats radar:

Les signaux radar se présentent sous la forme d'une coupe 2-D avec en exemple la coupe suivante:

En abscisse, la distance à l'origine;

En ordonnée la profondeur d'investigation estimée au travers de la constante diélectrique (étalonnage sur site ou tableaux de valeurs caractéristiques) ;

Le zéro horizontal est à l'origine du Profil ;

La profondeur est donnée depuis la surface du sol.

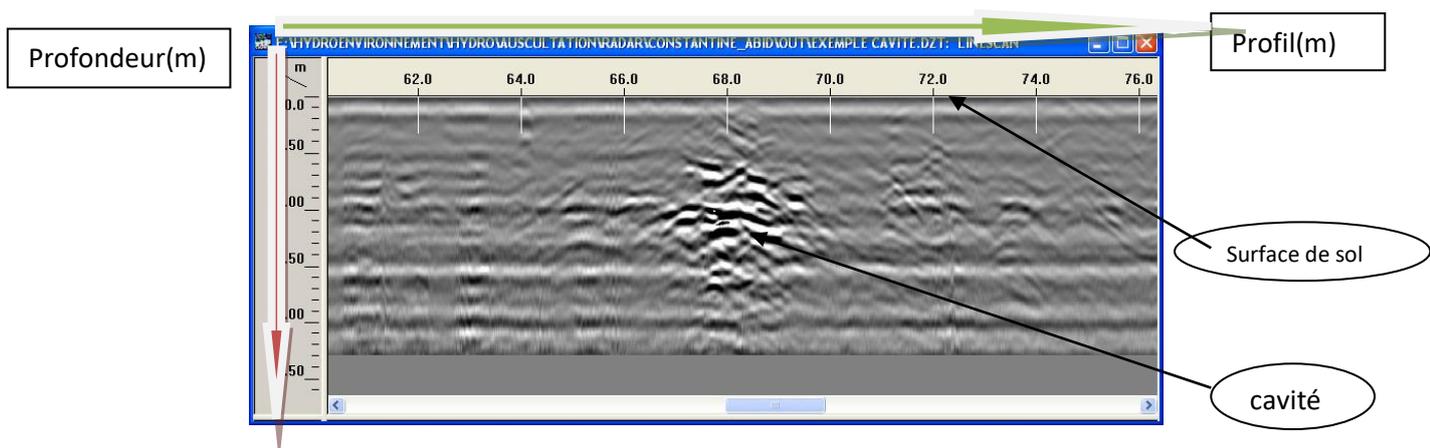


Figure :Radargramme 1 Exemple de cavité détectée.

I.26.1 Codes de couleurs :

Les signaux radar enregistrés par l'antenne réceptrice sont des signaux réfléchis dans la structure auscultée. Les fortes amplitudes correspondent à des interfaces, les signaux faibles à un matériau homogène. Les amplitudes sont définies par un code de couleur suivant (voir figure37) :



Figure 38: Table de couleur des signaux radar

Les amplitudes élevées (couleur blanche) correspondent à des couches fortement réfléchissantes, soit conducteurs (argileux par exemple), soit résistants et généralement plus raides (calcaire par exemple). Elles peuvent également correspondre à des vides ou à des décompressions. Le distinguo entre ces différents cas se fait par un traitement du signal en amplitude, en temps et en fréquence.

Les amplitudes moyennes et faibles correspondent à des terrains faiblement réfléchissants généralement meubles (sable par exemple).

Il est à noter qu'en absence d'étalonnage pour la détermination de la constante diélectrique qui doit être injectée pour connaître la profondeur avec exactitude, nous pouvons tout de même donner la profondeur des anomalies détectées avec une erreur de maximum 15 à 20%.

CHAPITRE 5: Cas d'étude et réalisation de la méthode GPR.

CHAPITRE 5 : Cas d'étude et réalisation de la méthode GPR

Matériel utilisé dans le chantier :

Nous avons utilisé les antennes 200 et 400 MHz qui permettent d'atteindre respectivement 5 et 3m de profondeur dans de bonnes conditions.

Ces conditions sont directement liées à la nature du sol.

L'antenne 400 MHz est utile car elle a une très bonne résolution sur le 0-3m.



CHAPITRE 5 : Cas d'étude et réalisation de la méthode GPR

I.27 Premier cas d'études et sont résultant (le projet de réalisation logements):

I.27.1 Les Mesures effectuées :

Nous avons réalisé un profil transversal tous les deux mètres et deux profils longitudinaux suite à l'apparition d'anomalies lors de l'acquisition des profils transversaux.



Figure 41: Orientation des Profils.

Les profils transversaux ont été effectués dans le sens Ouest/ Est, (flèche rouge).

Les profils longitudinaux ont été effectués dans le sens Sud / Nord (flèche verte).

En fonction des résultats de cette auscultation, nous effectuerons trois types de distinctions :

- **Cavité** : Correspond au signal d'une cavité.
- **Zone Fracturée (ZF)**: c'est une zone dont le terrain est très hétérogène avec la présence fracture qui correspond à une décompression du signal.
- **Zone Hétérogène (Zone hétérogène)** : Terrain hétérogène ne présentant pas de fracture nette, mais plusieurs interfaces correspondant à des sols différents

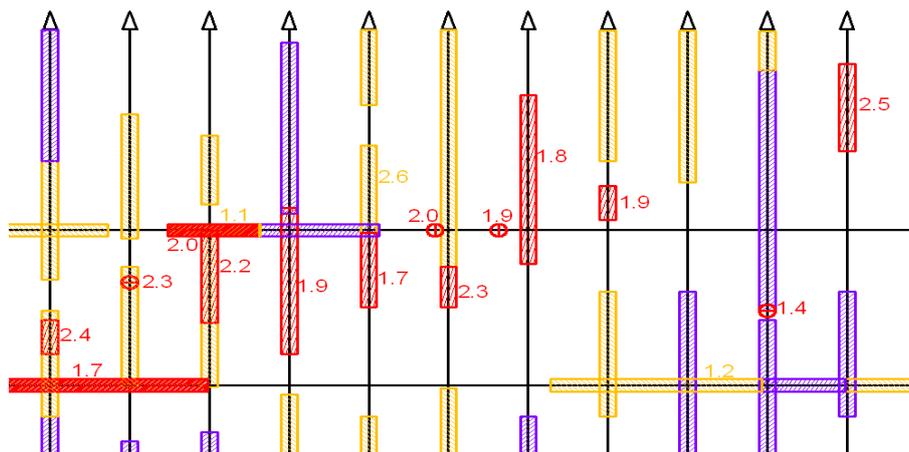


Figure 42: Exemple de résultat GPR



Figure 43: Légende

En fonction de la dimension, nous avons soit un trait lorsque l'anomalie est localisée ou un polygone hachuré lorsqu'il s'agit d'une zone.

Le nombre indiqué au dessus de l'anomalie correspond à la profondeur de l'anomalie.

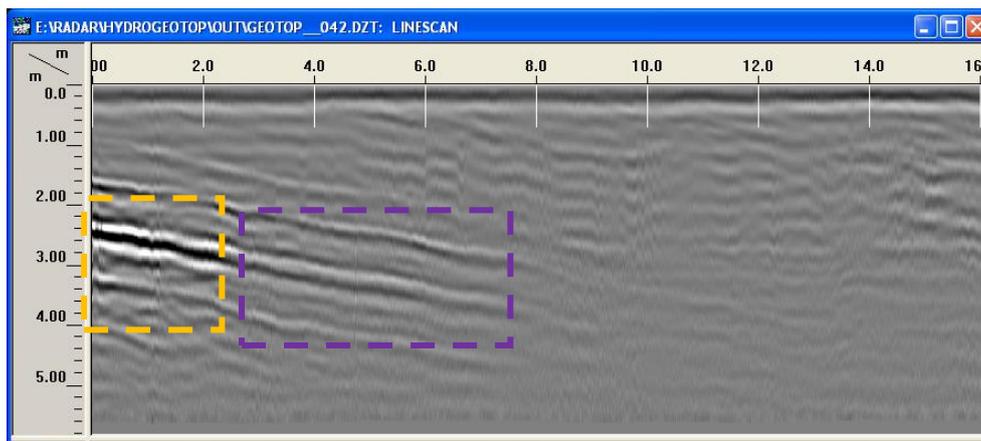
Le nombre de radargrammes et d'anomalies étant important, nous ne montreront dans cette partie que les radargrammes les plus significatifs.

Il est important de noter que les résultats ne concernent que le profil réalisé.

Plusieurs anomalies plus ou moins importantes ont été détectées.

Le Radargramme suivant montre une zone fracturée en début de profil, ainsi que ce qu'on appelé zone hétérogène.

CHAPITRE 5 : Cas d'étude et réalisation de la méthode GPR

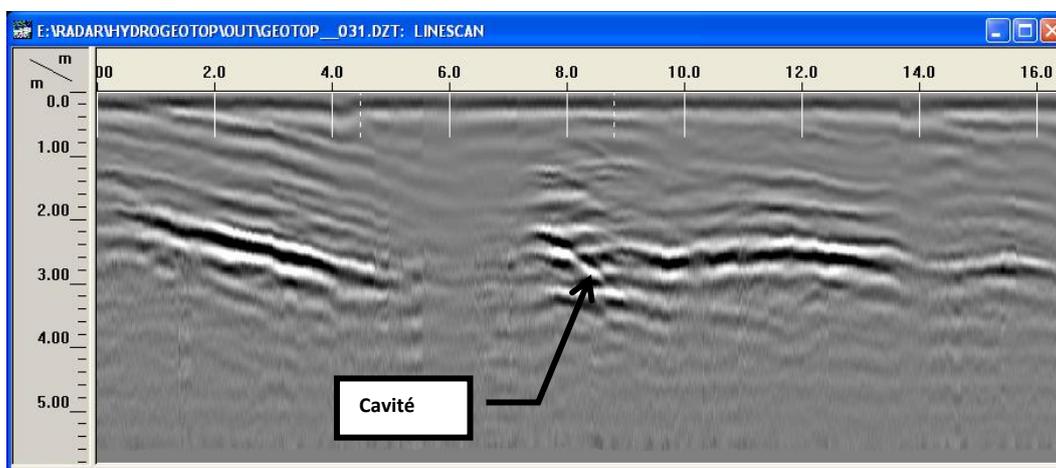


Radargramme 1 : Fichier 042

— : Zone Fracturée

— : Zone hétérogène

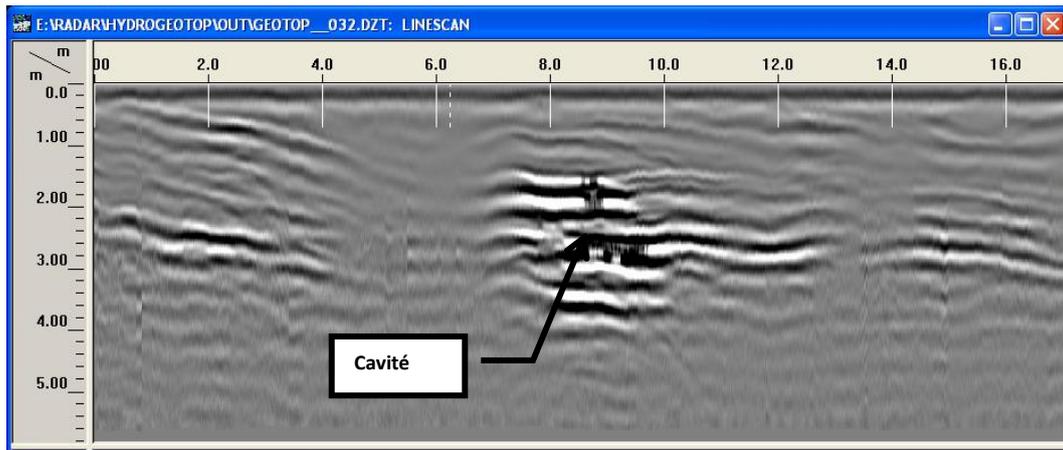
Sur le radargramme suivant nous avons observé une anomalie qui pourrait correspondre à une cavité, entre 7.5 et 8.8m du point de départ à une profondeur de 2.3m.



Radargramme 2 : Fichier 031

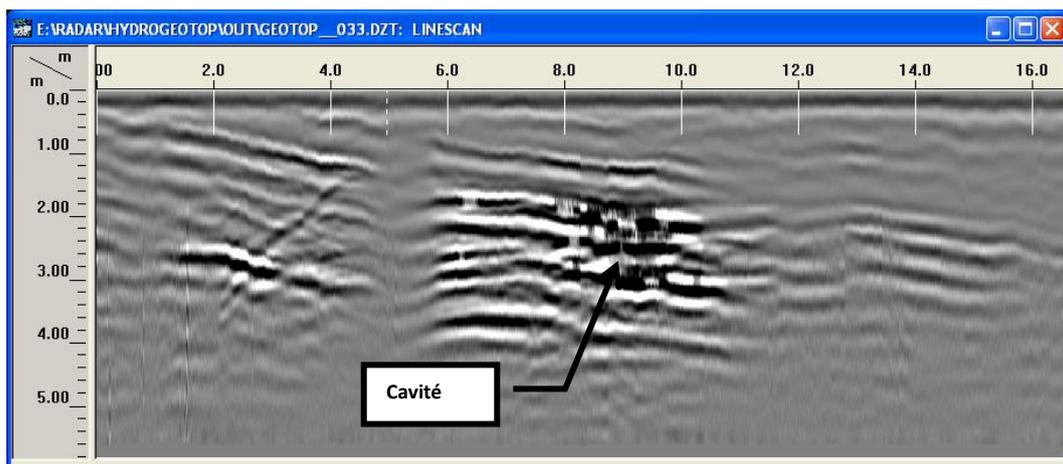
Il est également à noter que nous observons une fracture à partir de 8.8m et qui n'a pas le même pendage que celles rencontrées précédemment, à laquelle il faudra apporter plus d'attention car il pourrait s'agir du toit d'une cavité importante.

Sur le profil parallèle à deux mètres nous observons également une cavité à 1.7m de profondeur qui semble plus importante comme le montre le radargramme suivant :



Radargramme 3 : Fichier 032

Cette anomalie est également présente sur le profil suivant et semble être encore plus importante.



Radargramme 4 : Fichier 033

I.27.2 Conclusion :

En effet il s'avère suite à cette investigation la présence de cavités qui pourraient être importantes et qu'il faudra absolument confirmer par des sondages.

Il est également à noter la présence de fracture ainsi que de zones hétérogènes qui ont été également signalées sur une bonne partie de la surface auscultée.

En effet nous observons une zone hétérogène extérieure, suivie d'une zone fracturée et enfin plus au centre les cavités, qui pourraient dues à la une dissolution liée à la provenance des eaux à partir des zones hétérogènes et fracturées.

I.28 Deuxième cas d'études géophysique au niveau du bloc 12-14 sur une superficie de 576m²

I.28.1 Mesures effectuées

Nous avons réalisé un profil longitudinal avec les antennes 400 et 200 Mhz tous les deux mètres, et cinq profils transversaux et deux en diagonale au niveau de l'anomalie détectée avec uniquement l'antenne 400 MHz.



Figure 44: Profil longitudinal



Figure 45: Profil Transversal.

CHAPITRE 5 : Cas d'étude et réalisation de la méthode GPR

Les profils transversaux ont été effectués dans le sens Sud/Nord, (flèche rouge).

Les profils longitudinaux ont été effectués en zigzag (flèche verte).

I.28.2 RESULTATS DES MESURES.

En fonction des résultats de cette auscultation, nous effectuerons trois types de distinctions :

- **Zone Hétérogène (ZH)**, Zone comportant un terrain hétérogène
- **Anomalie** : c'est une variation du signal qui ne peut pas être clairement définie
- **Anomalie pouvant correspondre à une cavité (APC)**: Le signal reçu n'est pas celui d'une cavité franche mais qui pourrait correspondre à une cavité; elle peut être soit une importante cavité soit une cavité partiellement comblée.
- **Zone Fracturée (ZF)**: c'est une zone dont le terrain est très hétérogène avec la présence de fractures vides ou plus ou moins comblées.

L'ensemble des résultats sont fournis en représentés comme suit :

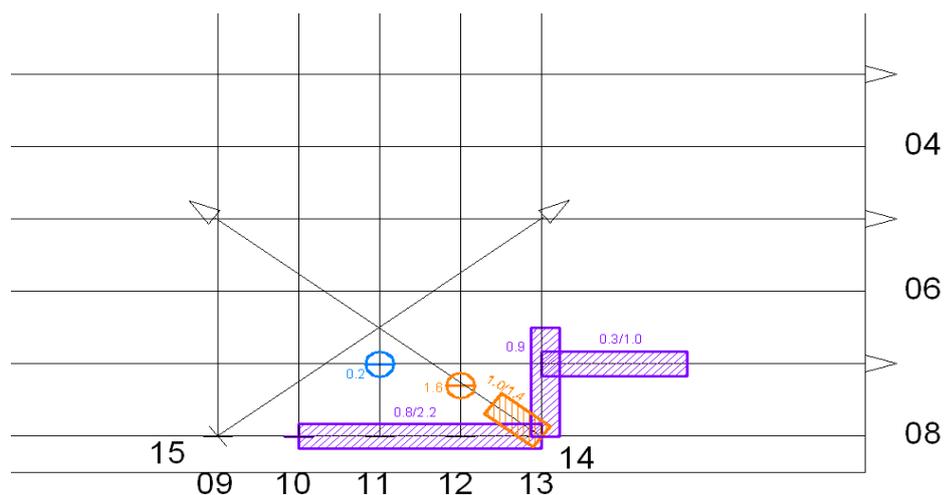


Figure 46 : Exemple de résultat.

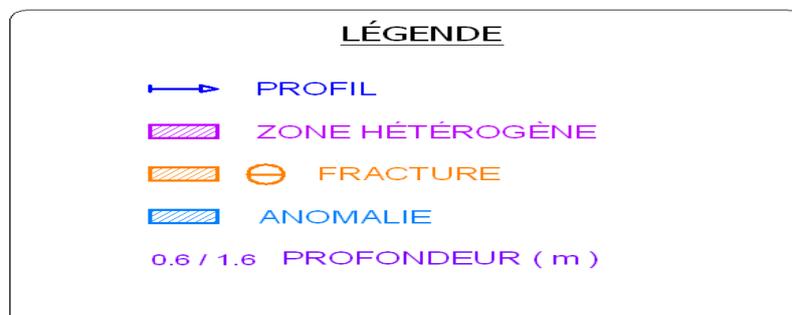


Figure 47 : légende.

CHAPITRE 5 : Cas d'étude et réalisation de la méthode GPR

En fonction de la dimension, nous avons soit un cercle lorsque l'anomalie est localisée ou un polygone hachuré lorsqu'il s'agit d'une zone.

Le nombre indiqué au dessus de l'anomalie correspond à la profondeur de l'anomalie.

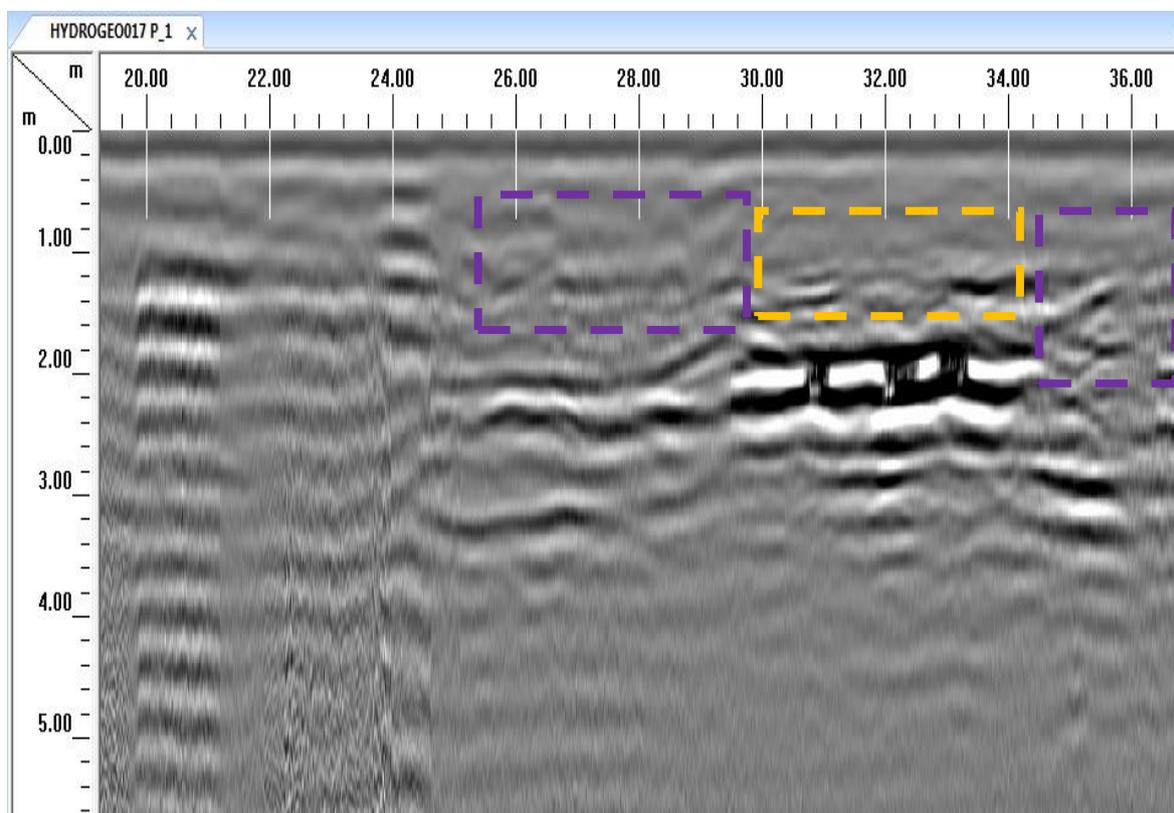
Le nombre de radargrammes et d'anomalies étant important, nous ne montreront dans cette partie que les radargrammes les plus significatifs.

Il est important de noter que les résultats ne concernent que le profil réalisé.

Deux zones distinctes ont montré plusieurs anomalies plus ou moins importantes.

En effet, la première zone qui n'a pas été mise en évidence lors des travaux a montré une zone fracturée comme le montrent les radargrammes suivants.

En effet le deuxième profil montre à la fois une zone fracturée et une zone hétérogène.



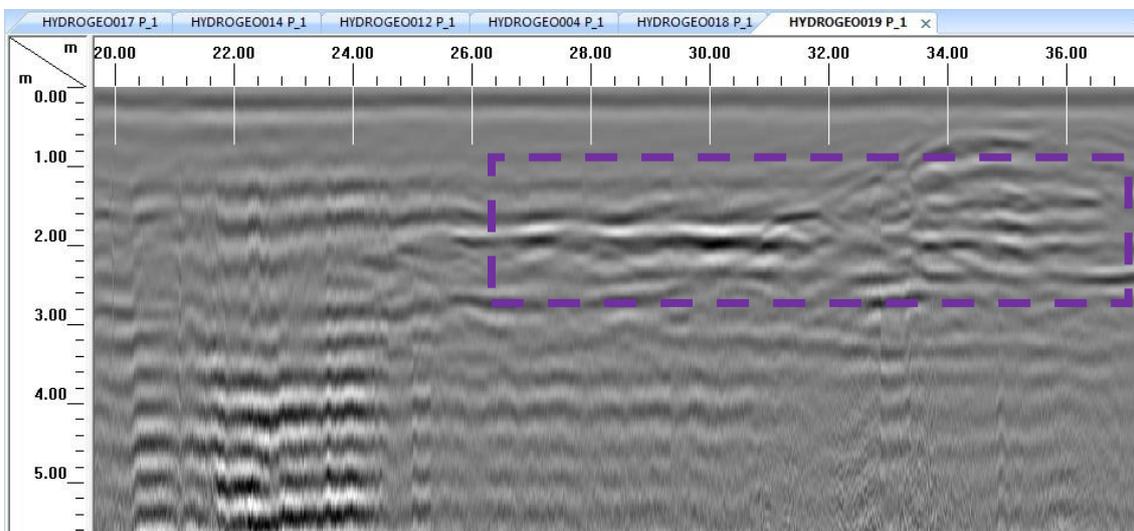
Radargramme 2 : Fichier 017 -Profil 02.

 : Zone hétérogène

 : Zone Fracturée

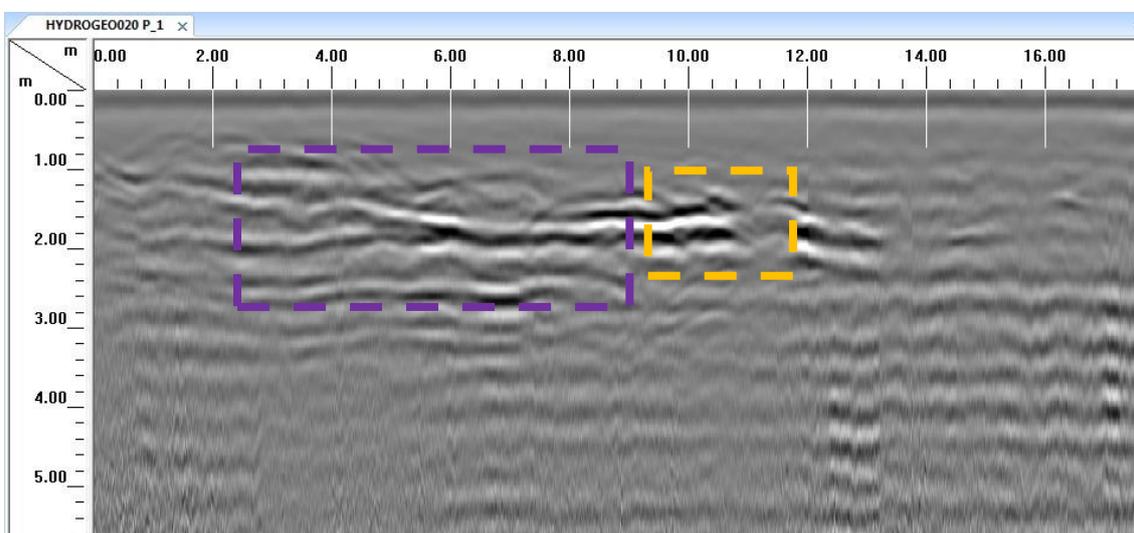
CHAPITRE 5 : Cas d'étude et réalisation de la méthode GPR

Ces hétérogénéités ont été constatées sur plusieurs profils comme le montrent les radargrammes suivants.



Radargramme 3 : Fichier 019 -Profil 04

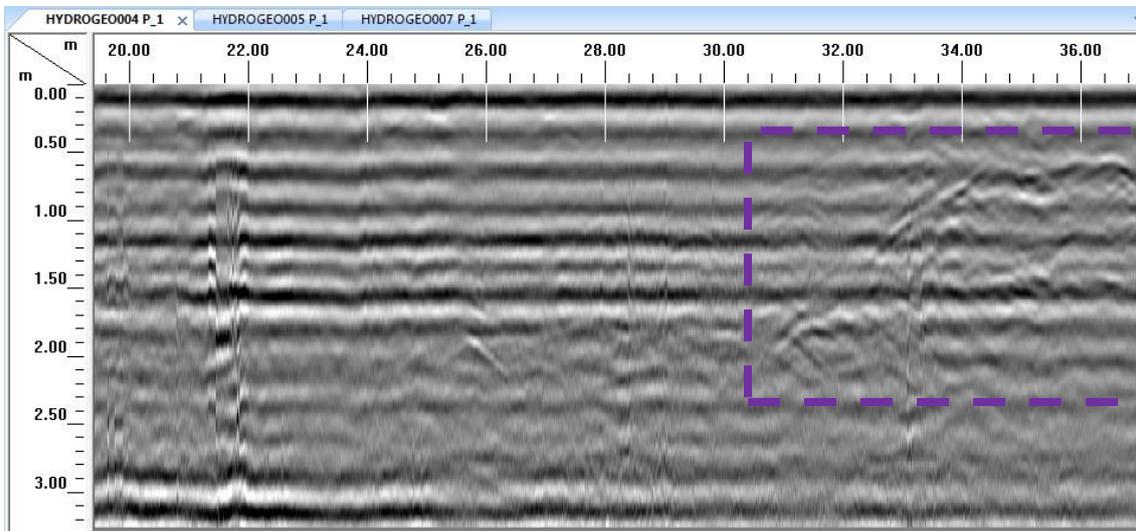
Sur ce radargramme nous observons une interface réflectrice correspondant probablement à la présence d'argile avec une partie fracturée (présence de vide).



Radargramme 4 : Fichier 020 -Profil 05

CHAPITRE 5 : Cas d'étude et réalisation de la méthode GPR

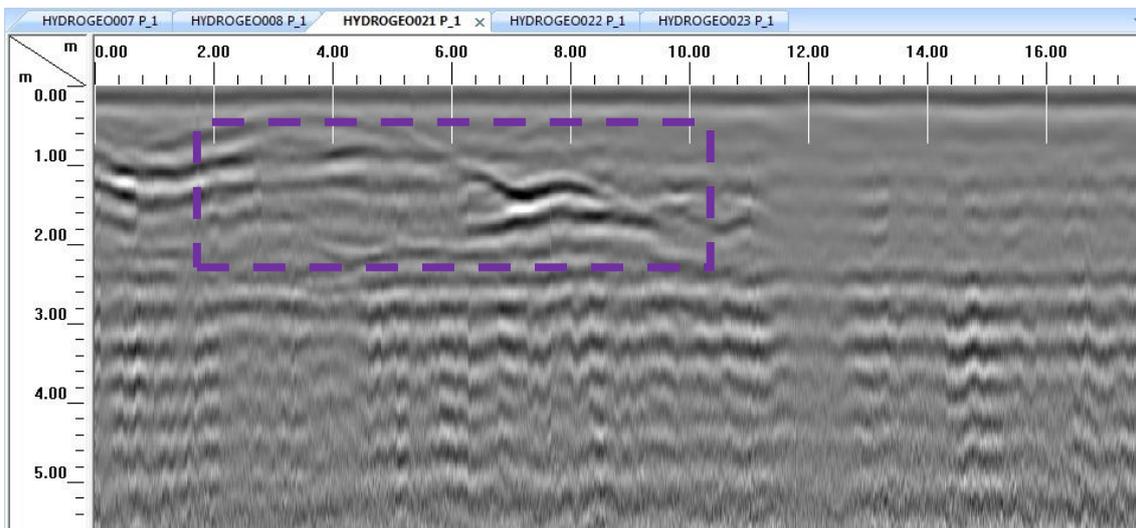
Ces hétérogénéités ont également été mises en évidence avec l'antenne 400 MHz.



Radargramme 5 : Fichier 04 -Profil 04

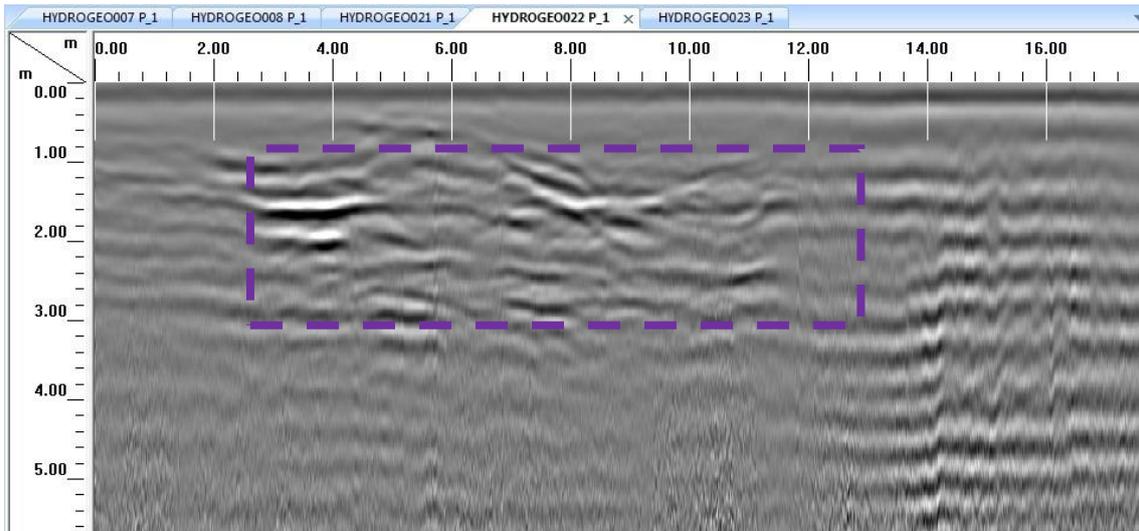
La deuxième zone qui a conduit à cette auscultation a eu une attention particulière.

Sur cette zone nous avons détecté une zone hétérogène, une zone fracturée ainsi qu'une anomalie profonde comme le montrent les radargrammes suivants.

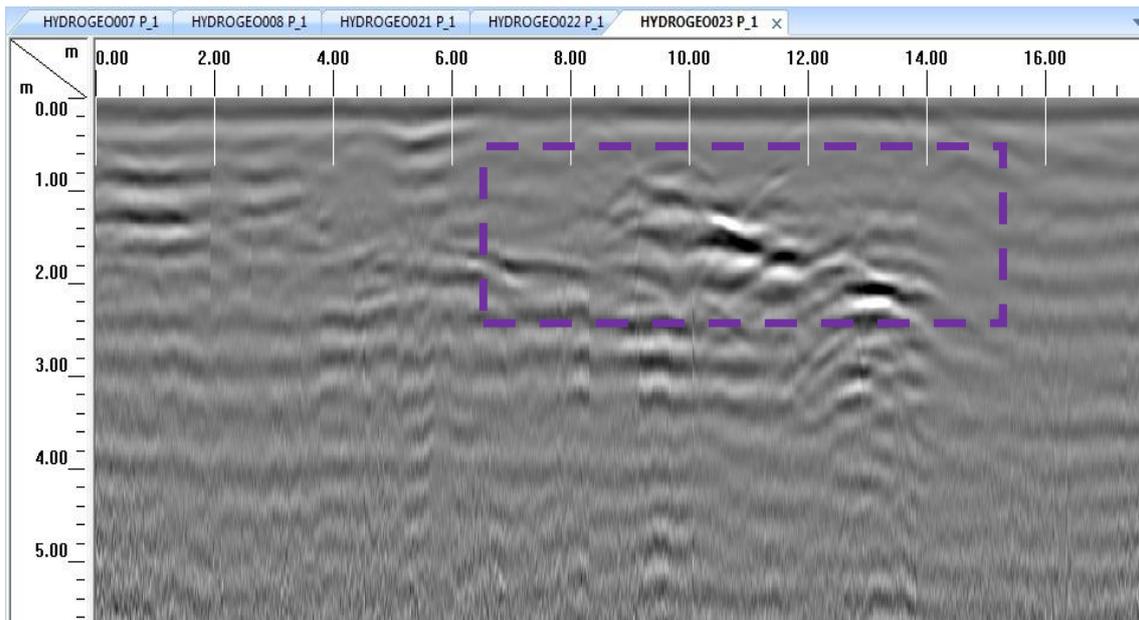


Radargramme 6 : Fichier 21 -Profil 06

CHAPITRE 5 : Cas d'étude et réalisation de la méthode GPR

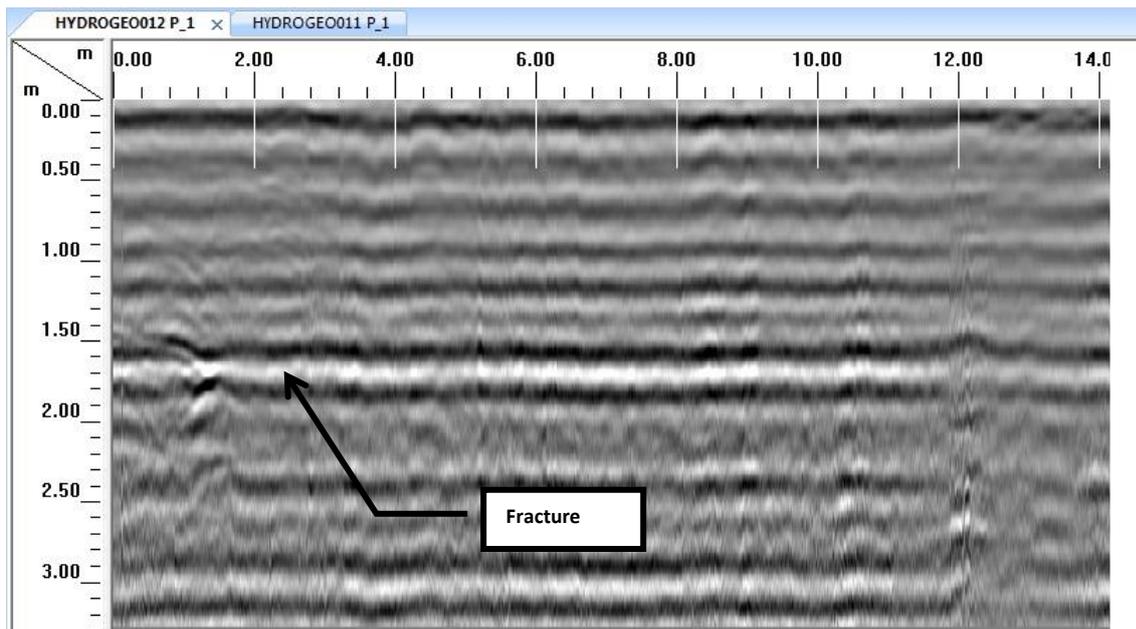


Radargramme 7 : Fichier 22 -Profil 07

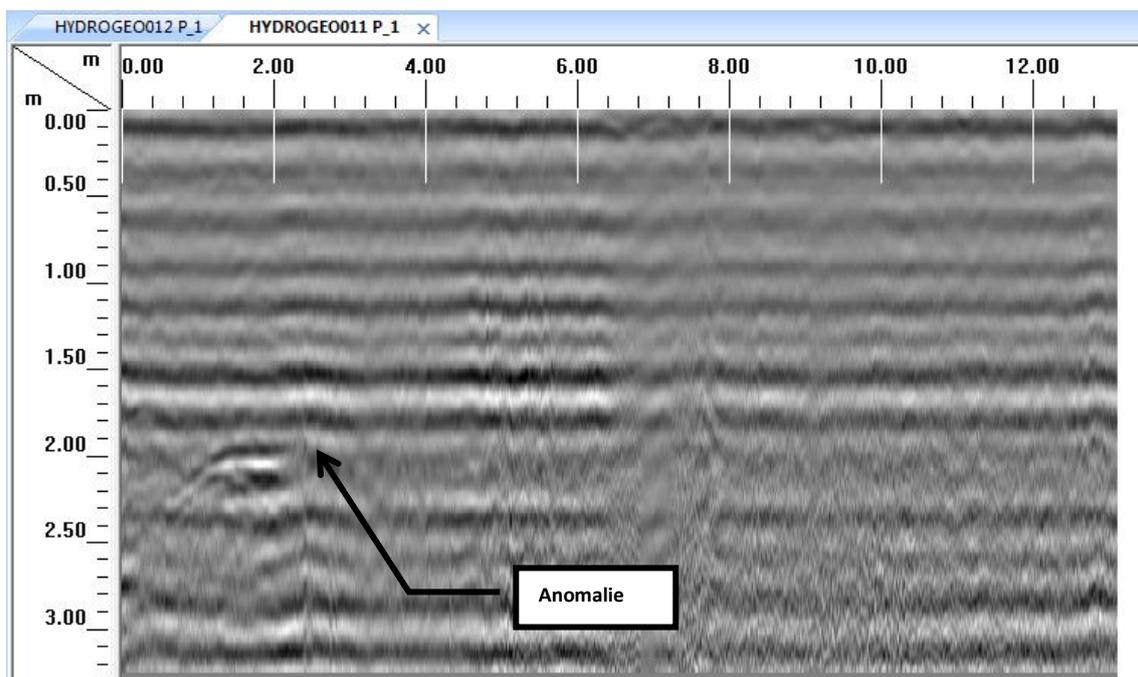


Radargramme 8 : Fichier 22 -Profil 07

Les profils transversaux ont montré une petite fracture et une anomalie.



Radargramme 9 : Fichier 12 -Profil Transversal



Radargramme 10 : Fichier 11 -Profil Transversal

L'ensemble de ces résultats avec la position et la profondeur de toutes les anomalies est transmis en Annexe.

I.28.3 Conclusion :

L'objectif de cette auscultation était de définir l'ampleur de la fracture détectée lors des travaux de réalisation.

Le maillage réalisé répond à cet objectif et nous a permis d'une part de constater la présence de zones hétérogènes correspondant probablement à la présence d'argile à la fois au niveau de la zone où la fracture a été constatée lors des travaux mais aussi une seconde zone sur la partie Ouest.

D'autre part, il n'a pas été détecté de cavités uniquement des fractures et une anomalie à 2m de profondeur qui n'a pas été bien définie.

Ces fractures sont situées au niveau des zones hétérogènes et correspondent probablement à un lessivage.

Vue l'hétérogénéité du terrain, qui favorise fortement le lessivage des particules fines du sol (Argiles, Limons), la protection du site contre les eaux de ruissèlement s'avère obligatoire.

L'injection d'un coulé de béton au niveau de la zone de fracturation pourra être envisagée, l'emplacement des sondages (trous d'injection) s'effectuera en présence de technicien.

I.29 CONCLUSION GENERALE :

Le géo radar est un outil de mesure précieux et ses domaines d'utilisations sont multiples (génie civil, exploration spatiale, déminage...). Bien qu'il s'agisse d'un Investissement lourd, son non destructivité permet de réduire les coûts de réalisation du gros œuvre dans le cas d'une application en génie civil.

L'avantage du radar géologie ou géo radar est de paramètre d'étudier la structure de sous-sol en calcaire avec une profondeur de pénétration maximal de 10 m pour bonne résultat.

Références et Bibliographies

- 1- **G.SANGLERAT** ; Le pénétromètre et ses applications.
- 2- **P.CASSAN** ; Les Essais in situ en mécanique des sols.
- 3- Recommandations pour les reconnaissances géotechniques USG .France.
- 4- **Les normes NFP 94-110 ; NFP ; 94-112 ; NFP 94-116 ; NFP 94-113 ; NF P 94 068.**
- 5- **JEAN-PIERRE MAGNAN** ; RESISTANCE AU CISAILLEMENT.
- 6- **Olivier Magnin, ves Bertrand** ; Guide Sismique réfraction. C216.
- 7- **Michel Chouteau Bernard Giroux** ; Géophysique appliquée II GLQ 3202 Méthodes électriques.
- 8- **Fiche thématique Reconnaissances géotechniques • Mars 2010.**
- 9- **M.Sc.A.** Guide pour la réalisation d'études de reconnaissance et de caractérisation des sols.2019.
- 10- **Annan, A.P.[1], and Davis, J.L.[1]** Ground Penetrating Radar—Coming of Age at Last.
- 11- **David J. Daniels** ; Ground Penetrating Radar, 2ndEdition.
- 12- **Giovanni Alberti, Luca Ciofaniello, Marco Della Noce, Salvatore Esposito, Giovanni Galiero, Raffaele Persico, Marco Sacchetti and Sergio Vetrella** A stepped frequency GPR system for underground prospecting 45, N. 2, April 2002.
- 13- **Harry M. Jol and Derald G. Smith** ;Ground penetrating radar: a brief overview and case study. p 487 – 492.
- 14- Investigation of the Proposed Dome- CARA Tunnel Route and Utilities at South Pole Station, Antarctica ; December 1995.
- 15- **Jeffrey J. Daniels**; Grounds Pénétration Radar Fundamentals, Nov. 25, 2000.
- 16- **John H. Bradford,1 William P. Clement,1 and Warren Barrash1** Estimating porosity with ground-penetrating radar reflection tomography: A controlled 3-D experiment at the Boise Hydrogeophysical Research Site ; 24 February 2009.
- 17- **Jose´ M. Carcione*, Ge´za Seriani, Davide Gei** Acoustic and electromagnetic properties of soils saturated with salt water and NAPL ; 14 January 2003.
- 18- **Mouhamed Sow**; Contribution à la conception de radars géologiques impulsionnels fonctionnant dans un milieu complexe. , le 11/02/2015.

- 19- **NEROUZ BOUBAKI** ;Détection de cavités par deux méthodes géophysiques : radar de sol et mesures de résistivités électriques 5 juillet 2013.
- 20- **NEROUZ BOUBAKI**, Détection de cavités par deux méthodes géophysiques :radar de sol et mesures de résistivités électriques ; le 5 juillet 2013.
- 21- **Olivier LOEFFLER**, Modélisation géoradar de la proche surface, estimation de la teneur en eau et influence d'un polluant ; le 04 février 2005.
- 22- **SBGIMR – BVIGRM**– Détection des cavités souterraines ; 7 mai 2008.
- 23- **Steven A. Arcone, Wayne Tobiasson and Allan J. Delaney** Ground-Penetrating Radar
- 24- **Steven C. Fisher*, Robert R. Stewart, and Harry M. Jolt** ;Processing ground penetrating radar (GPR) data.
- 25- **ARIS Y.**, 1994 : Etude tectonique et micro tectonique des séries jurassiques à plio- quaternaires du Constantinois central (Algérie nord orientale) caractérisation des différentes phases de déformations. Doctorat d'université, Nancy I, 215p.
- 26- **BAR C B.**, 1957: Etude géologique de la feuille au 1/50.000 d'Ain M'lila. Publ. Serv. Carte Géol. Algérie, Nlle série N°9. 249p.
- 27- **DURAND DELGA M.**, 1955 : Etude géologique de l'Ouest de la chaîne Numidique. Publ. serv. Carte géol. Algérie, Bull.
- 28- **GHANDRICHE H.** (1991) - Modalités de la superposition de structures de plissement chevauchement d'âge alpin dans les Aures (Algérie). Thèse de l'Univ. de Paris-Sud, centre d'Orsay, 189 p.
- 29- **GUELLALS S., et AL.** 1977: Les formations de type péni tellien dans l'Est de l'Algérie; Faciès, position structurale et paléogéographie. B.S.H.N. Afr. Nord.
- 30- **BENABBAS C ; 2006** : Evolution moi-plio-Quaternaire des bassins continentaux de l'Algérie nord orientale : Apport de la Photogéologie et Analyse Morpho-structurale.
- 31- **FOURCADE. E et RAOULT. J.F. (1971)** : Sur le Crétacé inférieur du Dj. Frikitia (môle néritique Constantine, Algérie) .CR.
- 32- **VILA J M.**, 1980: La chaîne alpine d'Algérie orientale et des confins algéro- tunisiens .Thèse Sc. Univ. Paris VI.
- 33- **DURAND DELGA M.**, 1969 : Mise au point sur la structure du Nord- Est de la Berbérie . Publ. Serv. Carte géol. Algérie, N. S., Bull.
- 34- **CHADI M.**, 1991: Etude géologique de monts de Ain M'lila (Algérie orientale). Thèse de Doctorat de l'Université de Nancy1, 191p.

Références et Bibliographies

- 35- **RAOULT. J.F. (1969)** : Relation entre la dorsale Kabyle et les flyshs sur la transversale du Dj Rhèdir, phases tangentielles Eocènes, Paléogéographie (Nord du Constantinois, Algérie).
- 36- **Mr BRAHMI Serhane. 2013** ; COMPORTEMENT DES ELEMENTS CHIMIQUES DANS LES EAUX DE SURFACE DU BARRAGE DE BENI HAROUN (EST ALGERIEN).
- 37- Carte géologie Constantine 50 000.
- 38- **HAMEL Ahmed. 29 Juin 2009** : HYDROGEOLOGIE DES SYSTEMES AQUIFERES EN PAYS MONTAGNEUX A CLIMAT SEMI –ARIDE CAS DE LA VALLEE D’OUED EL ABIOD (AURES)

Schéma du principe de la technique GPR :

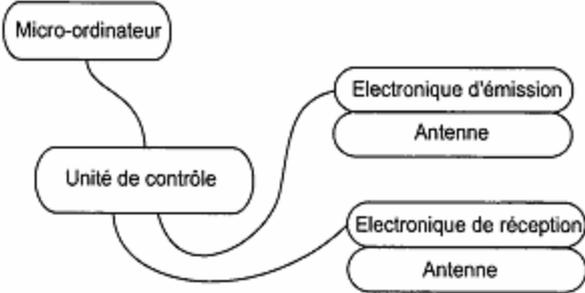


Figure : schéma Pour réalisation de GPR