

République Algérienne Démocratique et Populaire
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique
Université Djilali Bounaama de Khemis Miliana



Faculté des Sciences et de la Technologie
Département des Sciences et de la Matière

Mémoire Présenté
Pour l'obtention du diplôme de

Master en Physique

Option : Physique du Globe

Thème

**Etude des variations de la résistivité électrique en
fonction de certains paramètres physiques du sol par
des mesures à la boîte**

Réalisé par :

- LAROUBI
Ghania.
- HADROUG
Ghaniyya.

Encadreur : Mr. Mohammed Sid

Présidente : Mme. Mazouz

Examineur : Mr. Benhadj-tahar

Année Universitaire 2021/2022

Remerciements

Nous remercions tout d'abord le bon Dieu Allah tout puissant de nous avoir donnée le courage, la santé, la force et la patience pour accomplir ce travail humble.

Nous commençons à remercier notre encadreur : *M^r MOHAMED SID* qui nous a aidé et qui nous a laissé sa main ouverte, et qui a consacré son temps précieux et nous a accordé son attention avec une extrême patience pour finaliser ce travail.

Comme nous présentons nos grands remerciements à : *M^r BENTRIDI SALAH EDDINE* pour son soutien, ses conseils pertinents, les orientations tout au long de ce travail, et surtout leur encouragement.

Sans oublier la patience et la compréhension de nos jurys qui nous ont fait l'honneur d'évaluer et juger ce mémoire.

Nos sincères remerciements à tous les professeurs de la faculté des sciences et de la technologie Mr *BOUGARRA*, Mr *FERHI*; qui nous ont suivi durant notre cursus universitaire.

Enfin, toutes nos familles qui nous aidées et encouragées et soutenues dans les moments difficiles tout au long de la préparation de ce mémoire.

Dédicace

Je dédie cet humble travail à :

Mes chandelles de vie, mes parents qui ont toujours été là pour moi, aucune dédicace ne peut exprimer mon amour éternelle « Vous avez tout sacrifié pour vos enfants n'épargnant ni santé ni efforts. Vous m'avez donné un magnifique modèle de labeur et de persévérance. Je suis redevable d'une éducation dont je suis fier ». ».

Mes trois perles frangines et sœurs qui m'ont toujours entouré et motivé à sans cesse devenir meilleur **Amina, Hamida et Afef**; Mon cher frère **Abd**

ELkader.et mon fiancé **Abd EL-rezzek**

Tous ceux qui portent le nom « **Laroubi** » et tous ceux qui me connaissent de près ou de loin.

Ma deuxième sœur & ma binôme **Hadroug Ghania**.

Mes chères amies :

Fatima, Sara , Nassira ,Salah ,Ahlem

Toute la famille de la spécialité Physique du globe promotion 2021.

À tous ces intervenants, je présente mon respect et ma gratitude.

Ghania

Je dédie ce travail à :

Ceux qui sont dans mon cœur, qui ont veillés pour notre confort et sacrifié beaucoup pour notre réussite, Ma chère mère (que dieu me la garde).

A celui qui m'a toujours appris comment réfléchir avant d'agir, à celui qui m'a soutenu tout au long de ma vie scolaire, à celui qui n'a jamais épargné un effort pour mon bien, Mon cher père (Que dieu me le garde).

À mes précieuses sœurs

Karima, Saida, Fatiha, Kheira et ma petite chère Hayat

À tout mes frères vraiment merci pour vos encouragements et votre soutien.

A toute ma famille en particulier mes tantes et mes cousines

À ma chère binôme Laroubi GHANIA, je suis ravie de partager ce travail avec vous, je souhaite beaucoup de réussite dans votre vie.

À tous mes amis qui ont toujours été cotés dans les bons et mauvais

moment: Meriem, Fella, Souna, Djemila, Malika

A tous mes enseignants et mes amies de spécialité de la Physique du Globe

À tous ceux que j'aime et ceux qui m'aiment

Ghaniyya

الملخص :

في الآونة الأخيرة ، ازداد استخدام التنقيب الكهربائي مع الكثافة المكانية العالية للأقطاب الكهربائية ويتم تطبيقه على التحقيقات تحت الأرض لاستكشاف التعدين وأغراض الهندسة المدنية الأخرى. من أجل توصيف كتلة الصخور باستخدام توزيع مقاومة التربة ، الذي تم الحصول عليه من هذه التحقيقات ، من المهم فهم العلاقة بين المقاومة الكهربائية والخصائص الفيزيائية للصخور. في هذا العمل ، تم قياس المقاومة لأنواع مختلفة من التكوينات الجيولوجية لتوضيح تأثير الخصائص الفيزيائية للصخور على المقاومة. تميل مقاومة الصخور إلى الانخفاض مع زيادة المسامية. ومع ذلك ، لا تتطابق المقاومة دائمًا مع المسامية ، حتى في نفس النوع من الصخور ، بسبب التراكيب المعدنية المختلفة وهندسة المسام. تزداد مقاومة الصخور مع زيادة مقاومة سائل المسام ، بغض النظر عن نوع الصخور. ومع ذلك ، بين 20 و 100 أوم م ، وهي المقاومة المتاحة للمياه الجوفية في كتل الصخور ، كان لمقاومة سوائل المسام تأثير ضئيل على مقاومة الصخور. تتناقص مقاومة الصخور مع زيادة تشبع الماء إلى نقطة معينة ، وبعدها تصبح درجة هذا الانخفاض غير مهمة. بالإضافة إلى ذلك ، تزداد مقاومة الصخور غير المشبعة أضعافًا مضاعفة مع تقليل تشبع الماء بنسبة 20% أو أقل.

Résumé :

Récemment, l'utilisation de la prospection électrique avec une densité spatiale élevée d'électrodes a augmenté et est appliquée aux investigations souterraines pour l'exploration minière et d'autres objectifs de génie civil. Afin de caractériser la masse rocheuse à l'aide de la distribution de résistivité du sol, qui est obtenue à partir de ces investigations, il est important de comprendre la relation entre la résistivité électrique et les propriétés physiques des roches. Dans, ce travail, la résistivité de différents types de formations géologiques est mesurée pour élucider l'effet des propriétés physiques de la roche sur la résistivité. La résistivité des roches a tendance à diminuer lorsque la porosité augmente. Cependant, la résistivité ne correspond pas toujours à la porosité, même dans le même type de roche, en raison des différentes compositions minérales et géométries des pores. La résistivité des roches augmente avec l'augmentation de la résistivité du fluide interstitiel, quel que soit le type de roche. Cependant, entre 20 et 100 ohm-m, qui est la résistivité disponible des eaux souterraines dans les masses rocheuses, la résistivité des fluides interstitiels a eu peu d'effet sur la résistivité des roches. La résistivité des roches diminue avec l'augmentation de la saturation en eau jusqu'à un certain point, au-delà duquel le degré de cette baisse devient insignifiant. De plus, la résistivité des roches non saturées augmente exponentiellement avec la diminution de la saturation en eau de 20% ou moins.

Abstract:

Recently, the use of electrical prospecting with high spatial density of electrodes has increased and is applied to underground investigations for mining exploration and other civil engineering purposes. In order to characterize the rock mass using the soil resistivity distribution, which is obtained from these investigations, it is important to understand the relationship between electrical resistivity and the physical properties of rocks. In, this work, the resistivity of different types of geological formations is measured to elucidate the effect of physical properties of rock on resistivity. The resistivity of rocks tends to decrease as the porosity increases. However, resistivity does not always match porosity, even in the same type of rock, due to different mineral compositions and pore geometries. The resistivity of rocks increases with increasing resistivity of the pore fluid, regardless of the type of rock. However, between 20 and 100 ohm-m, which is the available resistivity of groundwater in rock masses, the resistivity of pore fluids had little effect on the resistivity of rocks. The resistivity of rocks decreases with increasing water saturation up to a certain point, beyond which the degree of this decrease becomes insignificant.

In addition, the resistivity of unsaturated rocks increases exponentially with decreasing water saturation by 20% or less.

Table des matières

Remerciements	i
i	
Dédicace.....	ii
Sommaire.....	iii
Liste des figures.....	v
Liste des Tableaux.....	vi
Liste des abréviations.....	vii
Introduction générale:.....	13
<i>Les Paramètres physiques des sols</i>	15
1- Introduction :	16
2 - Porosité :.....	16
2-1 La porosité géométrique ou porosité totale :	16
2-2 La porosité efficace ou porosité du drainage φ_e :.....	17
2-3 La porosité cinématique φ_c :.....	17
3 - densité :	17
4- teneur en eau :.....	18
<i>Méthodes électriques</i>	19
1- Méthodes géophysiques :	20
1-1-Méthodes sismiques.....	20
1-2-La méthode gravimétrie :.....	22
1-3-Les méthodes électromagnétiques :.....	23
1-4-Le géo-radar :.....	23

1-5-La radiométrie :.....	24
1-6-La méthode diagraphie :.....	25
2- Les méthodes électriques :.....	26
2-1- Notion de résistivité:.....	27
2-2- Loi d'ohm :.....	32
2-3- différents dispositifs.....	34
2-4- Sondages électriques :.....	37
2-5- Tomographie électrique:.....	38
2-6- Mesure à la boite :.....	39
Partie expérimentale.....	44
1- Introduction :	45
2- Réalisation des mesures et résultats :.....	49
3- Résultats des essais géotechniques en laboratoire	49
4- Comparaison paramètres physique, mesures de résistivité :.....	50
4-1- Relation résistivité teneur en eau.....	50
4-2- Relation résistivité porosité.....	52
5- Discussions des résultats	54
Conclusion générale :	55
Les références :.....	56

Liste des figures :

Figure 1: Représentation schématique des trois phases composant un sol et notation : a gauche les volumes d'air des grains du sol et d'eau a droit les poids d'eau et des grains.

Figure 2 : Schéma de principe de la propagation des ondes mécaniques. V_1 et V_2 (en m/s) sont respectivement les vitesses du premier terrain et du terrain sous-jacent[2]

Figure 3 : Schéma de principe du Géo-radar.

Figure 4 : Schéma d'une installation d'acquisition diagraphique [8]

Figure 5 : Schéma en coupe du principe de la prospection électrique. La ligne horizontale noire représente la surface du sol.

Figure 6: distribution du courant créée par une électrode dans un sol homogène et isotrope [2]

Figure 7 : distribution du courant créée par deux électrodes dans un sol homogène et isotrope [2]

Figure 8: Représentation schématique d'une résistance parcourue par un courant. La loi d'Ohm relie l'intensité I du courant à la valeur R de la résistance et à la tension U entre ses bornes par la relation.

Figure 9 Dispositifs généralement utilisés pour la mesure de la résistivité électrique : Wenner, Wenner Schlumberger, Wenner-Schlumberger reverse, dipôle dipôle ; avec A et B les électrodes d'injection et M et N les électrodes de mesure [12].

Figure 10: Sensibilité des dispositifs Wenner, Wenner Schlumberger et dipôle.dipôle [12] .

Figure 11: Méthodes géophysiques employées : cartographie d'électromagnétisme en champ proche à faible nombre d'induction ; sondage de polarisation provoquée spectrale ; tomographies de résistivité et de chargeabilité électrique [12].

Figure 12 : Principe de construction d'une pseudo-section pour la configuration Wenner.[13]

Figure 13 : boite de sol.

Figure14 : schéma représentatif du branchement de la boite de mesure[14].

Figure 15: 4-Electrode : Mesure de la résistance du sol ou d'un liquide par l'intermédiaire d'une boîte à électrolyte [14] .

Figure16 : Configuration de la mesure de résistivité

Figure 17 : représentation de la résistivité du mélange (roche-eau) en fonction de la teneur
eau du mélange

Figure 18 : représentation de la résistivité du mélange (roche-eau) en fonction de la porosité
calculée

Liste des Tableaux:

Tableau 1: Résistivité des eaux et de roche [2]

Tableau 2 : Classification générale des résistivités.

Tableau 3 : Résistivités moyennes des différents types de sol. [11] .

Tableau 4 : les échantillons et leur nature et leur profondeur.

Tableau 5 : le résultat final de résistivité de chaque échantillon

Liste des abréviations :

\emptyset_t : la porosité totale ou géométrique

φ_e : la porosité efficace

φ_c : La porosité cinématique

Da : la densité apparente

Θ : la teneur en eau volumique

W : la teneur en eau pondéral

PSV : Le profil sismique vertical

MT : La magnétotellurique

EM : le champ magnétique

GPR : ground penetrating radar

CND : contrôle non destructif

RFI : interférence radiofréquence

RAN : Radioactivité Naturelle

WS : Wenner Schlumberger

WSR : Wenner Schlumberger Reverse

TRE : La tomographie de résistivité électrique

ASTM G57 : Standard test method for measurement of soil resistivity using the wenner four-electrode method

NFP : norme géotechnique

ρ_w : résistivité de l'eau d'imbibition

S_w : la saturation

Introduction générale :

Habituellement, la reconnaissance géologique, le forage et l'étude de sismique réfraction sont entrepris dans les évaluations géologiques préliminaires des projets de génie civil. Cependant, des problèmes subsistent quant à la précision de ces données pour la classification des formations géologique complexe et le comportement attendu des eaux souterraines. Récemment, la prospection par résistivité électrique, qui fournit visuellement des informations géologiques, a été de plus en plus utilisée comme technique d'étude géophysique supplémentaire pour les tunnels, les barrages, les glissements de terrain et autres projets de génie civil. Matsui et al. (1993, 1997) ont montré clairement que cette technique a été conçue pour évaluer les propriétés de la masse rocheuse, puis pour estimer les conditions des zones de fracture de la faille, le comportement des eaux souterraines et la classification de la masse rocheuse dans les tunnels de montagne, ce qui ne peut être obtenu par le biais des vitesses des ondes sismiques. La résistivité d'un milieu géologique dépend de la porosité, de la saturation en eau et de la résistivité des eaux souterraines dans les fissures, les zones de fracture et les pores. Par conséquent, en utilisant les caractéristiques de la résistivité, il est possible d'obtenir des informations sur l'état d'une formation géologique donnée lors des études géophysiques préliminaires. La résistivité des diverses formations sédimentaires peut être donc mesurée pour élucider l'effet des propriétés physiques de la roche sur la résistivité. A partir des données de résistivité mesurées dans une boite d'échantillons de sol, les relations entre la résistivité et les propriétés physiques de la roche sont établies.

1

Premier Chapitre

Les Paramètres physiques des sols

1- Introduction :

Le sol est un mélange complexe de roches altérées (cailloux, sables, limons, argiles), de matière organique (vivante ou morte), de gaz, d'eau et de minéraux solubles, constitué au fil du temps en fonction du climat (température, humidité, vent, glace...), de la roche mère, de la topographie et des organismes vivants.

Mais au-delà de ses constituants, un sol est défini par ses propriétés, principalement sa texture (proportion de sable, limon, argile) et sa structure (taille et organisation des particules entre elles), qui influent sur toutes les autres. Il existe ainsi une grande variété de sols, qui assurent des fonctions vitales pour l'humanité (croissance des végétaux, support de vie...)

2 - Porosité :

Comme tout milieu à caractère discontinu, le sol peut être considéré comme un assemblage de pleins et de vides, l'organisation des uns conditionnant les caractéristiques des autres. Les pleins sont constitués par la phase solide, squelette et plasma (argile + substances organiques et colloïdales diverses). Les vides occupés par les phases liquides et gazeuses représentent le système poral, siège des phénomènes de transfert, dont l'importance est évidente sur le plan du fonctionnement physico-hydrique des sols.

D'une manière générale, la porosité d'un sol est définie comme étant sa capacité à l'état solide à se laisser pénétrer par un fluide, appelée : capacité d'absorption ; elle est dépendante de l'importance du pourcentage des vides que contient le sol. Par ailleurs, et vu l'importance de ce paramètre de porosité dans la texture des sols et on distingue :[1]

2-1 La porosité géométrique ou porosité totale :

\emptyset ou absolue, qui est le rapport entre le volume des vides et le volume total de la roche :

$$\emptyset_t = \frac{\text{volume des vides}}{\text{volume totale de la roche}}$$

C'est une grandeur sans unité exprimée en %. On distingue la porosité *primaire* et la porosité *secondaire*. La porosité *primaire*, formée pendant le dépôt du sédiment, est de type intergranulaire. Son importance dépend du degré de classement des grains et de leur forme.

Elle ne dépend pas de leur taille. La porosité primaire que l'on rencontre surtout dans les roches détritiques diminue généralement avec le temps sous l'effet de la cimentation et de la compaction. La porosité *secondaire* englobe la porosité vacuolaire acquise par dissolution dans les roches d'origine chimique ou biochimique, la porosité de fracture et la porosité due à l'altération.

2-2 La porosité efficace ou porosité du drainage ϕ_e :

Qui représente le volume d'eau qui peut être drainé par l'action de la force gravitaire jusqu'à atteindre l'équilibre de saturation

$$\phi_e = \frac{\text{volume d'eau gravitaire}}{\text{volume total de la roche}}$$

2-3 La porosité cinématique ϕ_c :

Qui qualifie le volume d'eau mobile en zone saturée sous l'action d'un gradient de charge[2]

$$\phi_c = \frac{\text{volume d'eau mobile}}{\text{volume total de la roche}}$$

3 - densité :

La densité est un poids par unité de volume, normalement exprimée en gramme par centimètre cube (g/cm³). L'eau a une densité de 1 g/cm³ (à 4° C). Deux types de mesures de densité sont utilisés généralement pour les sols. La densité réelle (d_r) correspond à la densité d'une terre sèche désagrégée : la moyenne pour le sol est de 2,65 g/cm³ ; la densité apparente (d_a) correspond au poids sec d'un volume de sol dont la structure n'a pas été perturbée. Il est aussi la masse d'une unité de volume du sol séché à 105 °C. Ce volume comprend aussi bien les solides que les pores. Elle est mesurée par la méthode des cylindres en utilisant les échantillons non perturbés, connaissant le poids sec constant des échantillons à 105°C et le volume des cylindres des prélèvements utilisés. La densité apparente du sol traduit globalement l'état de compaction du matériau et indirectement, la porosité totale

La densité apparente est l'un des paramètres les plus importants dans les études portant sur la structure du sol. Elle est, en effet, liée à la nature et à l'organisation des constituants du sol.

Elle permet, en outre, de calculer la porosité et d'apprécier ainsi indirectement la perméabilité, la résistance à la pénétration des racines, la cohésion des horizons et la réserve en eau du sol.[1]

4- teneur en eau :

La quantité de liquide ou d'eau contenu dans le sol est variable dans le temps et dans l'espace. Sa caractérisation est importante et elle est définie par la teneur en eau volumique et la teneur en eau pondérale.

- **La teneur en eau volumique "θ"** est définie comme le rapport du volume d'eau contenu dans le sol à son volume apparent de sol (ou volume total de sol) :

$$\theta = \frac{V_e}{V_t}$$

- **La teneur en eau pondérale "w"** est quant à elle définie comme le rapport de la masse d'eau contenu dans le sol à la masse des particules de sol :

$$W = \frac{M_e}{M_s}$$

En hydrologie, les teneurs en eau volumiques sont utilisées car elles facilitent les calculs alors qu'en agronomie, il est de tradition d'utiliser les teneurs en eau pondérales. Il existe une relation entre la teneur en eau volumique et la teneur en eau pondérale d'un sol :[3]

$$\theta = \frac{\rho_{as}}{\rho_e} w$$

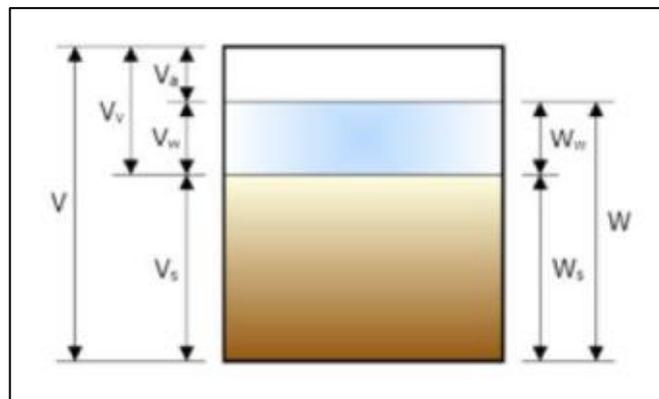


Figure 1: Représentation schématique des trois phases composant un sol et notation : a gauche les volumes d'air des grains du sol et d'eau a droit les poids d'eau et des grains

2

Deuxième Chapitre

Méthodes électriques

1- Méthodes géophysiques :

Les quatre principaux paramètres physiques sont la résistivité électrique, la densité, la vitesse de propagation des ondes élastiques et la susceptibilité magnétique. Chacun de ces paramètres détermine une méthode fondamentale de prospection géophysique : électrique, gravimétrique, sismique et magnétique. Le nombre de méthodes est donc restreint, mais les techniques de mesures sont nombreuses et utilisent parfois conjointement deux méthodes. Ainsi, on peut encore élargir les méthodes en ajoutant la méthode électromagnétique

1-1- Méthodes sismiques

La sismique étudie les variations de la vitesse sismique du sous-sol (la propagation des ondes élastiques), variations qui sont en relation avec la dureté, le degré de consolidation et la saturation. Avec cette méthode on peut distinguer la roche compacte du terrain meuble, la roche compacte et la roche altérée, les zones fracturées dans une roche saine, le niveau de la nappe phréatique.

En effet, le paramètre qui nous intéresse est la vitesse de propagation de ces ondes dans le sous-sol. Ces ondes ont été générées par une source sur ou dans le sol. Chaque roche peut être caractérisée par la mesure de la vitesse sismique qui lui est propre. Cette propagation des ondes élastiques dépend des propriétés élastiques des roches composant le sous-sol.

Les ondes sismiques sont principalement de deux types (figure 2) :

- les ondes de volume
 - ◀ Ondes de compression P ou ondes longitudinales ou ondes primaires
 - ◀ Ondes de cisaillement S ou ondes transversales ou ondes secondaires
- les ondes de surface ou ondes guidées
 - ◀ Ondes de Rayleigh
 - ◀ Ondes de Love. [2]

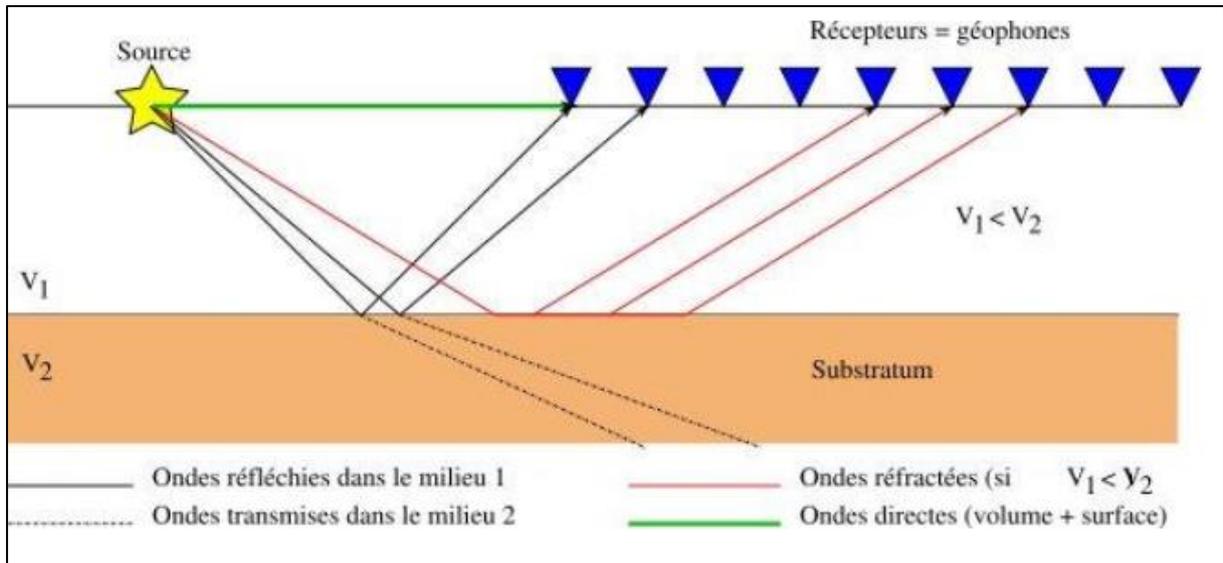


Figure 2 : Schéma de principe de la propagation des ondes mécaniques. V_1 et V_2 (en m/s) sont respectivement les vitesses du premier terrain et du terrain sous-jacent.[2]

Cette méthode engendre plusieurs disciplines qui diffèrent selon leur mise en œuvre et le type d'évènements exploités.

On peut citer :

- **La sismique réfraction** : cette technique est basée sur l'exploitation des ondes réfractées qui prennent naissance dans des conditions spécifiques (à partir d'un certain angle d'incidence critique) et la position de source-géophones disposées en surface selon une configuration déterminée à l'avance.
- **La sismique réflexion** : cette technique est similaire à la précédente, sauf qu'elle exploite les ondes réfléchies et un échelon de source-géophones disposé en surface.
- **La sismique de puits** : cette technique diffère des autres par sa mise en œuvre particulière car elle est réalisée dans un puits. On peut distinguer trois types de sismique de puits : tirs en surface avec récepteurs dans le puits (Profil Sismique

Vertical), tirs en puits avec récepteur en surface, et tir dans un puits avec récepteur dans un autre puits.

- La technique des tirs en surface comprend, le profil sismique vertical zéro offset, le profil sismique vertical à offset, et la ballade sismique (walkaway).
- Le profil sismique vertical (PSV) est une technique de la sismique de puits pour laquelle un signal est émis à la surface du sol et enregistré par un ou plusieurs géophones situés successivement à différentes profondeurs dans le puits.

1-2- La méthode gravimétrie :

La gravimétrie est une méthode de prospection géophysique basée sur l'exploitation du champ de gravité.

Tout corps doté d'une masse (densité) situé en surface ou sous terre (enfouis) est attiré vers le centre de la terre par une force proportionnelle au produit des deux masses respectivement la masse du corps et la masse de terre (supposée concentrée en son centre) et inversement proportionnelle au carré de la distance qui les sépare cela se traduit par l'expression suivants :

$$F = k.M.m/R^2$$

(avec $m=1$; très négligeable devant M masse de la terre), alors g devient :

$$g = k.M /R^2$$

Où : $K=6,674.10^{-11}.m^3kg^{-1}s^{-2}$ ou bien $K=N. m^2kg^{-2}$; R : rayon de la terre

Rayon polaire = 6356.75km

Rayon équatorial = 6378.14 km

$$g=9,780318(1+5,3024.10^{-3}.sin^2(L))+5,9.10^{-6}sin^2(2L)$$

Où L : latitude du point $g_{pole}=9,83ms^{-2}$ $g_{aquateur}= 9,78 m.s^{-2}$

(C'est g anomalie est obtenu en faisant la différence entre la valeur de g théorique et la valeur de g mesurée à l'aide d'un gravimètre, des corrections dites de Bouguer sont introduites (correction d'air libre correction de plateau ; correction de relief) [4]

$$Anomalie_{bouguer} = g_{mes} - g_{th} + C_{al} + C_{PL} + C_{relief}$$

Où : g_{mes} : mesure observée

g_{th} : valeur théorique de la pesanteur

C_{al} : correction air libre

C_{PL} : correction de plateau

C_{relief} : correction de rel

1-3- Les méthodes électromagnétiques :

Le principe des méthodes électromagnétiques à basse fréquence repose sur l'étude de la variation des champs électromagnétiques induits dans le sous sol. En effet, des courants électriques induits circulent dans la terre. Les champs électromagnétiques associés sont enregistrés à la surface de la terre en prospection terrestre ou sur le fond marin en prospection marine. Un traitement adéquat sur les champs électriques et les champs magnétiques mesurés permet d'obtenir une donnée permettant de caractériser le sous sol par sa conductivité électrique.[5]

Habituellement on peut distinguer différentes techniques de mesures suivant la source et les fréquences utilisées

- **La magnétotellurique(MT)** qui utilise des champs naturels lointains à des fréquences très basses de l'ordre de quelques Hz. En remplaçant la source du champ primaire par un champ EM artificiel.

- **La technique Slingram** : à faible nombre d'induction, qui est constituée de deux bobines émettrice et réceptrice. Les fréquences utilisées sont de l'ordre de 20 Hz à 10 kHz. Une grande particularité de cette technique est que la profondeur d'investigation n'est pas liée est principalement fonction de la distance entre les bobines émettrice et réceptrice, et non plus de la fréquence utilisée.[2]

1-4- Le géo-radar :

Le Géo-radar (GPR ou ground penetrating radar) est l'une des méthodes géophysiques les plus récentes et les moins coûteuses. C'est une méthode qui est souvent appliquée en milieu urbain particulièrement, du fait de sa rapidité d'exécution et pour la qualité des informations pour des cibles contenues dans le sous-sol. Cette technique permet l'investigation jusqu'aux premières dizaines

de mètres sous la surface. En hydrogéologie, le GPR est employé pour localiser des zones fracturées, des cavités souterraines, des zones karstiques. En secteur urbain, il permet de détecter les canalisations enterrées. Nous l'illustrons ci- après par quelques exemples.

Cette technique, que les ingénieurs préoccupés par les problèmes de subsurface rangent dans la rubrique du « contrôle non destructif CND », est basée sur l'utilisation des ondes électromagnétiques de hautes fréquences comprises entre 10MHz et 1 GHz, pour mettre en évidence des contrastes de constante diélectrique. Les ondes sont émises dans le sol, lorsqu'elles rencontrent des réflecteurs (structures géologiques, alternances de roches de propriétés diélectriques différentes, canalisations) une partie des ondes se réfléchit vers la surface où elles sont captées et enregistrées par une antenne de réception. [6]

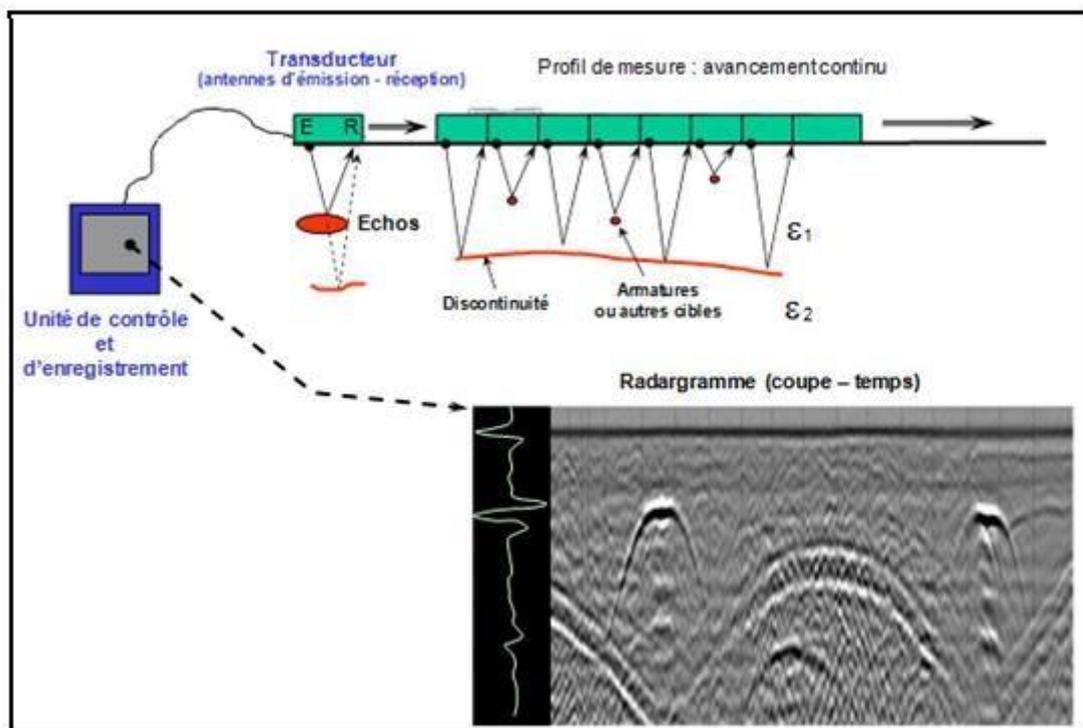


Figure 3 : Schéma de principe du Géo-radar

1-5- La radiométrie :

La **radiométrie** est le domaine qui étudie la mesure de l'énergie transportée par les rayonnements, dont les rayonnements électromagnétiques comme la lumière visible.

Un radiomètre est un instrument passif qui mesure le flux électromagnétique reçu par une antenne. Le flux mesuré provient, dans notre cas, du rayonnement (émission) du milieu naturel (atmosphère, surface de l’océan), du rayonnement extra-terrestre (soleil, galaxie), mais aussi de sources anthropiques que l’on appelle interférence radiofréquence (RFI — Radio Frequency Interference). [7]

1-6- La méthode diagraphie :

Une diagraphie est un enregistrement continu des variations d’un paramètre physique en fonction de la profondeur. Des outils, conçus dans ce but, sont descendus dans le trou de forage à l’extrémité d’un câble qui assure la liaison avec les instruments de surface commandant les opérations. Enregistrées lors d’un arrêt ou en fin de forage, les diagraphies offrent la possibilité de caractériser les différents constituants du sous-sol, d’affiner les corrélations lithostratigraphiques entre les puits d’une même région et de déterminer les paramètres mécaniques et hydrauliques des formations. Utilisées et développées par l’industrie pétrolière depuis près d’un siècle (1927), les diagraphies ne sont couramment employées pour la recherche et la caractérisation des aquifères que depuis une quinzaine d’années. Des outils spécifiques adaptés aux enregistrements en forages de petits diamètres ont dû être conçus à cet effet. Une gamme complète de sondes a été utilisée dans ce travail de recherche. Ces outils peuvent être regroupés en quelques familles, les diagraphies électriques, les diagraphies nucléaires et les diagraphies du fluide.[8]

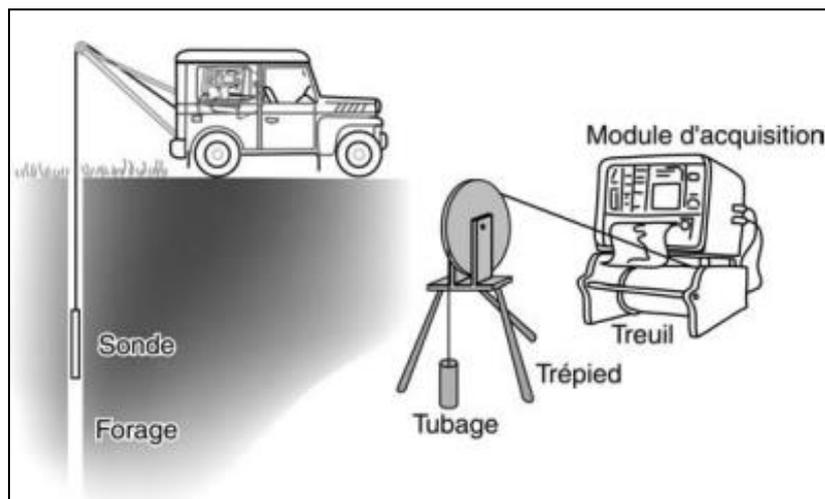


Figure 4 : Schéma d’une installation d’acquisition diagraphique.[8]

Il existe de nombreuses méthodes diagraphiques. Parmi les plus couramment employées dans le domaine du génie civil, les plus simples à mettre en œuvre et qui sont adaptées à l'auscultation des digues des voies navigables, il est possible de citer :

- **la diagraphie de gamma-ray :**

Gamma-ray ou de RAN (RadioActivité Naturelle). Cette technique mesure le nombre de particules radioactives naturelles émises par les terrains traversés le long de la colonne de forage. Elle permet, sur plusieurs colonnes de forages, de mettre en évidence des éventuels pendages des structures et de localiser, relativement, les niveaux riches en minéraux radioactifs, souvent associés à des niveaux argileux (Fig.54) . Il n'existe aucune limite ou contre-indication à l'emploi de cette méthode, qui de plus est très bon marché. À ce titre, c'est une technique qui devrait être systématiquement employée suite à la réalisation d'une campagne de forages : elle permet en effet de valoriser les sondages destructifs, souvent difficiles à exploiter en terme lithologique.

- **la diagraphie microsismique :**

Cette technique mesure, en fonction de la profondeur, la vitesse de propagation des ondes P. Elle apparaît intéressante pour la caractérisation mécanique du substratum sur lequel repose le corps de digue.

- **la diagraphie électrique :**

Cette diagraphie mesure la résistivité des terrains le long de la colonne de forage. Elle est intéressante pour étalonner et interpréter quantitativement les prospections électriques et électromagnétiques de surface (le panneau électrique par exemple) lorsque la géométrie des terrains est complexe. [9]

2- Les méthodes électriques :

La méthode électrique pour l'étude d'un milieu non homogène comme le sous-sol a été très tôt appliquée par Maxwell (1891, in Meunier 1976) ; elle consiste à injecter un courant électrique dans le sol à l'aide de deux électrodes (A et B) et mesurer la différence de potentiel par une autre paire d'électrodes (M et N). C'est le processus de mesure d'un sondage électrique, ainsi en s'éloignant progressivement de part et d'autre du centre du dispositif

(dispositif de Schlumberger), à chaque fois on effectue la mesure correspondante. On détermine ainsi la résistivité apparente pour chaque pas de la longueur AB. Le traitement d'un sondage consiste à donner la répartition verticale de la résistivité du sol en un point précis à partir de la surface (centre du dispositif).

Des profilages électriques peuvent être réalisés à l'aide d'un système multi-électrodes qui permet d'obtenir des sections ou images 2D ou 3D traduisant la distribution de la résistivité électrique dans le sol. La profondeur d'investigation des méthodes électriques est fonction de l'espacement maximal entre les électrodes. Plus cet espacement est grand, plus la profondeur d'investigation est grande.

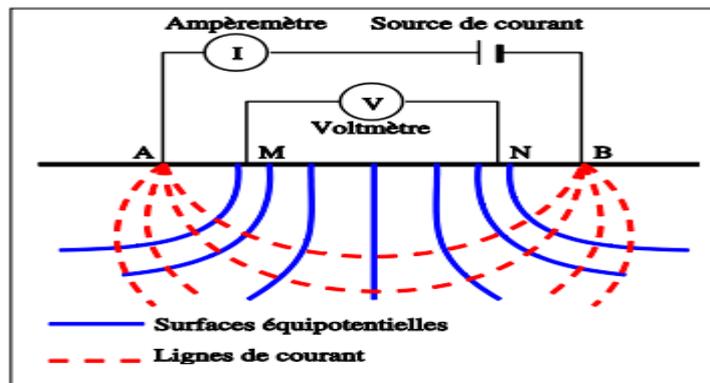


Figure 5: Schéma en coupe du principe de la prospection électrique. La ligne horizontale noire représente la surface du sol.

2-1- Notion de la résistivité :

La résistance mesure l'opposition au passage électrique est donnée par le quotient du potentiel V appliqué aux bornes d'un matériau par le courant I qui circule, soit d'un courant électrique, et peut permettre de caractériser un matériau.

Cependant, en prospection électrique la notion de résistance n'a pas vraiment de signification puisque si on prend deux échantillons de longueur différente du même matériau, ils n'auront pas la même résistance, tandis que deux échantillons de matériaux différents peuvent présenter la même valeur. Puisque la résistance dépend de la géométrie du corps, on doit se baser sur une propriété qui, tout en caractérisant la facilité à laisser passer le courant, est indépendante de la géométrie de l'échantillon choisi. Cette propriété s'appelle *la résistivité électrique ρ* . [10]

La résistivité électrique ρ (ou son inverse la conductivité, $\sigma = 1/\rho$) d'un milieu est par définition la propriété physique qui détermine l'aptitude de ce milieu à s'opposer au passage du courant électrique. Elle est exprimée en ohm. Mètre ($\Omega.m$ ou ohm) et la conductivité en siemens/mètre (S/m) ; en hydrogéologie on utilise habituellement la conductivité en ms./m ou le $\mu S/cm$ pour avoir des valeurs entières. La résistivité d'un sol dépend essentiellement de la teneur en eau, de la minéralisation de l'eau, de la teneur en argile ainsi que de la granulométrie.

En général, la résistivité électrique du sol ne peut pas être mesurée directement, elle est déduite de la mesure de la différence de potentiel entre deux points. La résistivité électrique ρ d'un cylindre homogène, de longueur L et de section S, parcouru par un courant dans la direction de son axe est donné par la formule suivante :

$$\rho = R \frac{S}{L} \quad (\text{III. 1})$$

Où R, la résistance en Ω , est donnée par la loi d'Ohm :

$$R = \frac{V}{I} \quad (\text{III. 2})$$

Avec V le potentiel en volt (V) et I l'intensité du courant en ampère (A).

Pour calculer le potentiel créé par l'injection d'un courant I à travers une surface S, il faut introduire le vecteur densité de courant J dirigé dans le sens de la propagation du Courant. Cette densité est égale à :

$$J = \frac{I}{S} \quad (\text{III. 3})$$

Le champ électrique est un vecteur dérivant d'un potentiel :

$$E = - \text{grad}(V) \quad (\text{III.4})$$

A partir des équations (III. 1), (III. 2), (III. 3), (III.4) on obtient :

$$E = \rho j = \text{ou } j = \frac{I}{\rho} E = \sigma E \quad (\text{III. 5})$$

Dans un sol homogène et isotrope de résistivité ρ , on injecte à une électrode A (figure 6) un courant électrique I, la deuxième électrode étant considérée suffisamment loin pour que la

distribution du courant soit homogène. La valeur de la densité de courant J peut être obtenue en divisant l'intensité du courant total I par la surface traversée par le courant. La surface d'une demi-sphère de rayon r est égale à $2\pi r^2$:

$$J = \frac{I}{2\pi r^2} \quad (\text{III. 6}) \quad \text{et} \quad E = \rho j = \rho \frac{I}{2\pi r^2} \quad (\text{III. 7})$$

D'après l'équation III.4, on obtient :

$$V = \frac{\rho I}{2\pi r} \quad (\text{III. 8})$$

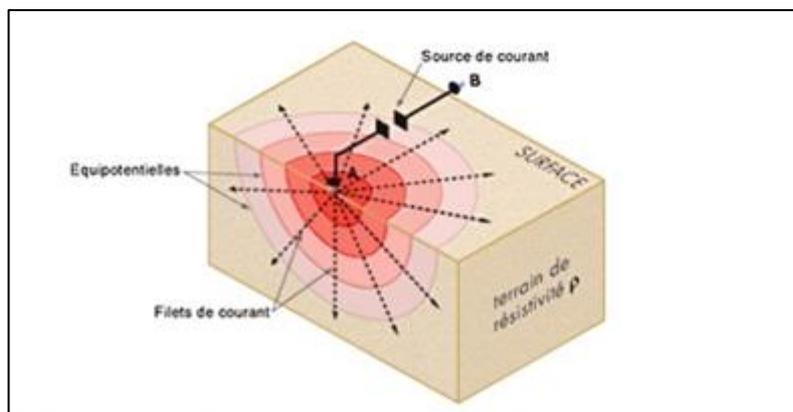


Figure 6: distribution du courant créée par une électrode dans un sol homogène et isotrope. [2]

Pratiquement, la mesure de la résistivité en un point est réalisée à la surface du sol ; à partir de deux électrodes, dites électrodes d'injection, A et B, on envoie un courant électrique d'intensité I dans le sol et on mesure la différence de potentiel entre deux autres électrodes, dites de potentiel, M et N. Dans le cas où le sol est homogène et isotrope, la répartition des lignes de courant et des équipotentielles a l'aspect présenté sur la figure

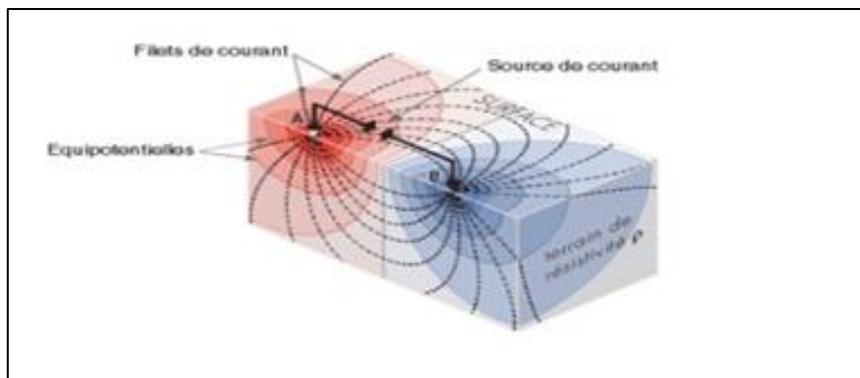


Figure 7 : distribution du courant créée par deux électrodes dans un sol homogène et isotrope [2]

Le potentiel à l'électrode M selon l'équation III.8 sera :

$$V_M = \frac{\rho I}{2\pi} \left[\frac{1}{AM} - \frac{1}{BM} \right] \quad (\text{III. 9})$$

Entre les électrodes M et N, on mesure la différence de potentiel (ΔV) due à l'action conjuguée de A et B :

$$\Delta V_{MN} = V_M - V_N = \frac{\rho I}{2\pi} \left[\frac{1}{AM} - \frac{1}{BM} - \frac{1}{AN} + \frac{1}{BN} \right] \quad (\text{III. 10})$$

La résistivité est ainsi donnée par la formule suivante :

$$\rho = K \frac{\Delta V_{MN}}{I} \quad (\text{III. 11})$$

Où :

ρ : s'exprime en ohm.mètre : $\Omega.m$

ΔV : s'exprime en millivolt : mV

I : s'exprime en milliampère : mA

K : est le coefficient géométrique (en m) fonction de la disposition des électrodes :

$$K = \frac{2\pi}{\left[\frac{1}{AM} - \frac{1}{AN} \right] - \left[\frac{1}{BM} - \frac{1}{BN} \right]} \quad (\text{III. 12})$$

Lorsqu'on mesure dans un sol qui n'est pas homogène et anisotrope, la résistivité mesurée n'est pas une résistivité réelle (vraie) du sol. La différence du potentiel mesurée sur le terrain, à partir de la formule III.11 est normalisée et donne une grandeur en $\Omega.m$ qu'on appelle résistivité apparente notée ρ_a qui dépend donc de la nature du sous-sol et de l'arrangement des électrodes. [2]

S'il n'existe pas de réel contraste de résistivité entre les formations, la méthode est inapplicable. De plus, il faut que le courant électrique puisse atteindre les objets à étudier en profondeur et que les anomalies dues aux hétérogénéités du sous-sol soient mesurables [2]

Le tableau ci-après présente les valeurs de la résistivité de quelques types d'eau et de roches rencontrés sur des zones karstiques. [2]

Eaux ou roches	Résistivité ($\Omega.m$)	Conductivité ($\mu S/cm$)
Eau de la mer	0,2	$50 \cdot 10^3$
Eau de nappes alluviales	10-30	330-1000
Eau de sources karstiques	10-100	100-1000
Sable et graviers secs	1000-10000	1-10
Sable et graviers imbibés d'eau douce	50-500	20-200
Sable et graviers imbibés d'eau salée	0,5-5	$2000-20 \cdot 10^3$
Argiles	0,2-20	$500-50 \cdot 10^3$
Marnes	20-100	100-500
Calcaires	300-1000	10-33

Tableau 1: Résistivité des eaux et de roche. [2]

Les valeurs de résistivité varient beaucoup, d'après la substance pour les roches et les minéraux, elle peut aller de 10^{-3} à 10^{17} ohms/m. On trouvera une classification générale au tableau 2 ci-dessous (Slaoui Hasnaoui ,2003), tandis que le tableau 3 contient la gamme des résistivités de certains types communs de sols [11]

Description	Résistivité en ohms-mètres
bon conducteur	$10^{-3} - 10$
conducteur de qualité moyenne	$10^2 - 10^9$
conducteur de qualité médiocre	$10^{10} - 10^{17}$

Tableau 2 : Classification générale des résistivités

Nature du terrain	Résistivité ($\Omega.m$)	Nature du terrain	Résistivité ($\Omega.m$)
Terrain marécageux	De quelques unités à 30	Calcaires fissurés	500 à 1000
Limon	20 à 100	Schistes	50 à 300
Humus	100 à 150	Calcaire tendre	100 à 500
Tourbe humide	5 à 100	Calcaires compacts	1000 à 5000
Argile plastique	50	Sol pierreux nu	1500 à 3000
Marnes et argiles compactes	100 à 200	Sol pierreux recouvert de gazon	300 à 500
Sable argileux	50 à 500	Micaschistes	800
Sable siliceux	200 à 3000	Granits et Grès	100 à 10000

Tableau 3 : Résistivités moyennes des différents types de sol. [11]

2-2- Loi d Ohm :

La loi d'Ohm est une loi physique empirique qui lie l'intensité du courant électrique traversant un dipôle électrique à la tension à ses bornes. Cette loi permet de déterminer la valeur d'une résistance (cour : Qu'est ce que la loi 'ohm 2017) . La loi d'Ohm a été ainsi nommée en référence au physicien allemand Georg Simon Ohm qui la publie en 1827, dans son œuvre *Die galvanische Kette: mathematisch bearbeitet*

➤ Énoncé de la loi d'Ohm :

On note :

U : la tension aux bornes de la résistance ;

I : l'intensité du courant qui circule à travers la résistance ;

R : la valeur de la résistance.

La loi d'Ohm établit que (en convention récepteur) :

$$U = R \cdot I$$

Un dipôle électrique vérifiant la loi d'Ohm est appelé un *conducteur ohmique*

➤ **Unités :**

Dans la loi d'Ohm, la tension est exprimée en **volts** (V), la résistance en **ohms** (Ω) et l'intensité en **ampères** (A)

➤ **Interprétation de la loi d'Ohm :**

La loi d'Ohm indique que la tension aux bornes d'une résistance est proportionnelle à l'intensité du courant qui la traverse. Ce coefficient de proportionnalité est la valeur de la résistance.

La valeur de la résistance R est une constante et ne varie donc pas lorsque l'on modifie la tension ou l'intensité

➤ **Utilisation de la loi :**

Selon son expression et les grandeurs connues, la loi d'Ohm permet d'obtenir différentes grandeurs :

. Sous la forme $U = R \times I$, elle permet de calculer la tension lorsque la résistance et l'intensité sont connues

. Sous la forme $I = U / R$, elle permet de calculer l'intensité lorsque la tension et la résistance sont connues ;

. Sous la forme $R = U / I$, elle permet de calculer la résistance lorsque la tension et l'intensité sont connues (Loi d'ohm : cours 2017)

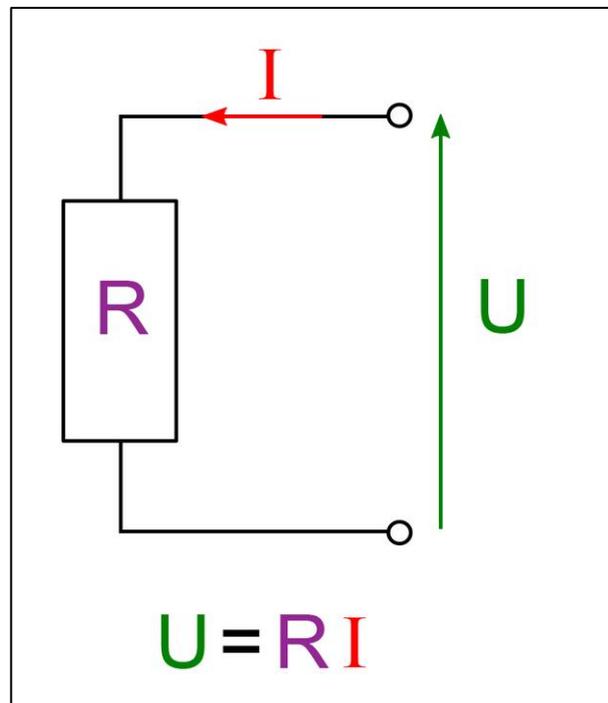


Figure 8: Représentation schématique d'une résistance parcourue par un courant. La loi d'Ohm relie l'intensité I du courant à la valeur R de la résistance et à la tension U entre ses bornes par la relation.

2-3- Les différents dispositifs:

Pour l'établissement d'une carte de résistivité les dispositifs les plus variés peuvent être envisagés. Tout dispositif de mesure comporte en fait quatre électrodes, deux A et B, pour l'envoi de courant " circuit d'émission " et deux M et N, pour la mesure du potentiel ΔV "circuit de mesure". [9]

Les dispositifs les plus couramment utilisés en géophysique environnementale sont les dispositifs dipôle-dipôle, Wenner, Wenner-Schlumberger et dans une moindre mesure Wenner Schlumberger Reverse (Figure 9) [12]

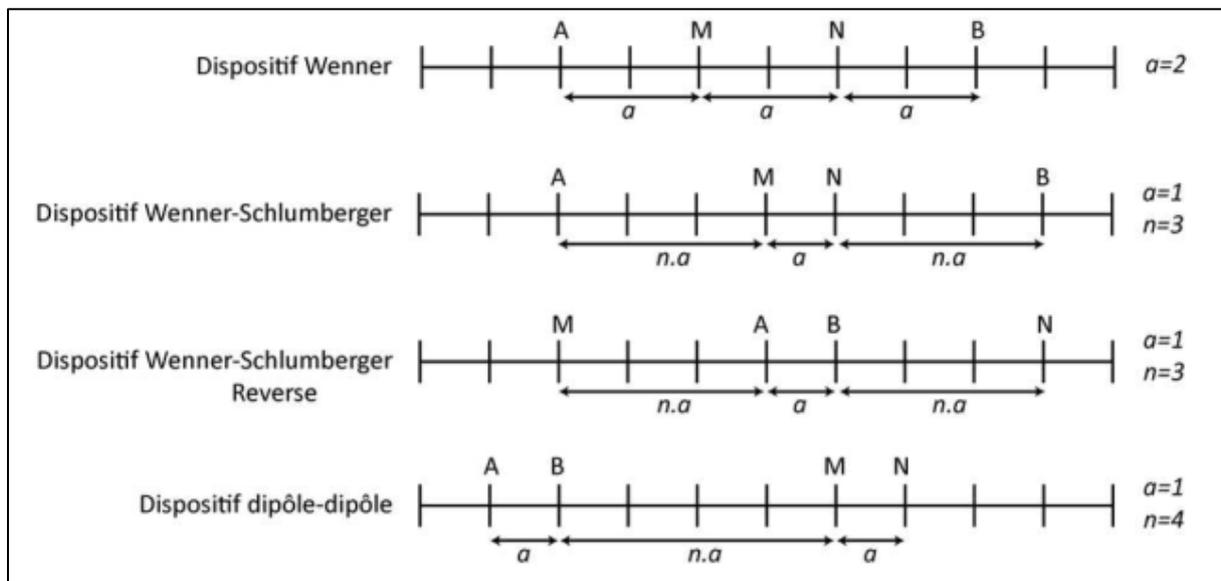


Figure 9 Dispositifs généralement utilisés pour la mesure de la résistivité électrique : Wenner, Wenner Schlumberger, Wenner-Schlumberger reverse, dipôle dipôle ; avec A et B les électrodes d'injection et M et N les électrodes de mesure [12] .

Dans le dispositif dipôle-dipôle, le dipôle formé par les électrodes d'injection est placé d'un côté du quadripôle et le dipôle formé par les électrodes de mesure de l'autre côté. La distance entre les deux électrodes d'injection et les deux électrodes de mesure notée a , et la distance séparant ces deux dipôles est égale à $n \cdot a$. Pour garder un rapport signal/bruit satisfaisant, il est conseillé de garder un facteur n inférieur à 6, voire inférieur à 3 (d'après des travaux non publiés)

Le dispositif Wenner est un dispositif symétrique où les électrodes de mesure sont placées entre les électrodes d'injection. La distance entre les électrodes successives est équivalente et égale à a . Ce dispositif présente un très bon rapport signal/bruit, mais les combinaisons d'arrangement des électrodes sont restreintes.

Le dispositif Wenner Schlumberger (WS) est également un dispositif symétrique où les électrodes de mesure sont placées entre les électrodes d'injection. La distance entre les électrodes d'injection est de a et de $n.a$ entre une électrode d'injection et une électrode de potentiel. Lorsque n augmente, le rapport signal/bruit diminue. Le nombre de combinaisons possibles est supérieur à celui permis par le dispositif Wenner

Des appareils d'acquisition multicanaux ont été développés d'un point de vue instrumental afin (i) d'injecter un courant sur un dipôle (ii) de mesurer des différences de potentiel sur plusieurs dipôles simultanément. Afin d'optimiser l'option multicanal qu'offrent ces appareils, le dispositif Wenner Schlumberger Reverse (WSR) peut être utilisé : ce dispositif correspond à un dispositif WS dont les électrodes d'injection et de mesure sont interverties : les électrodes d'injection sont placées entre les électrodes de mesure. Le rapport signal/bruit du dispositif WSR est cependant moins bon que celui du dispositif WS, les électrodes de mesure étant davantage éloignées l'une de l'autre et la taille du dipôle d'injection plus petit que dans le cas du dispositif WS.

Les dispositifs asymétriques qui nécessitent de placer une ou deux électrodes à l'infini comme les dispositifs pôle-dipôle ou pôle-pôle sont plus sensibles aux bruits électromagnétiques et telluriques. Ces bruits étant courants sur les sites urbains, ce type de dispositif n'a pas été utilisé [12] .

Sensibilité des dispositifs :

Les caractéristiques de l'information collectée avec les différents dispositifs varient suivant l'agencement des électrodes. La sensibilité de la mesure en un point par rapport à une variation des propriétés électriques du terrain peut être étudiée pour chaque dispositif. La sensibilité permet de savoir dans quelle mesure une variation de la résistivité vraie dans une région va influencer la mesure de la différence de potentiel. Plus la valeur de sensibilité est grande, plus l'influence d'une variation de la résistivité est importante.

Selon le dispositif employé, la sensibilité varie (Figure 10). De façon générale, la sensibilité est forte à proximité des électrodes, ce qui signifie qu'un objet situé à proximité de celles-ci

aura un impact important sur les mesures de potentiel. Avec l'écartement des électrodes, les différences de sensibilité s'amplifient entre les différents dispositifs. Les régions de sensibilité peuvent être positives ou négatives

Le dispositif Wenner montre des contours des valeurs de sensibilité quasiment horizontaux au centre du dispositif, ce qui le rend performant pour la résolution verticale. Au contraire, le dispositif dipôle-dipôle montre des contours des valeurs de sensibilité quasiment verticaux de part et d'autre du quadripôle, ce qui le rend sensible aux évolutions latérales de résistivité. Il est à noter que pour ce dispositif, la sensibilité maximale est mesurée entre les deux dipôles d'injection et de mesure. Il est déconseillé de trop augmenter l'écartement entre les dipôles, c'est-à-dire utiliser un facteur n trop important (Figure). Le dispositif WS présente un compromis entre ces deux dispositifs, avec des contours des valeurs de sensibilité ni horizontaux ni verticaux [12].

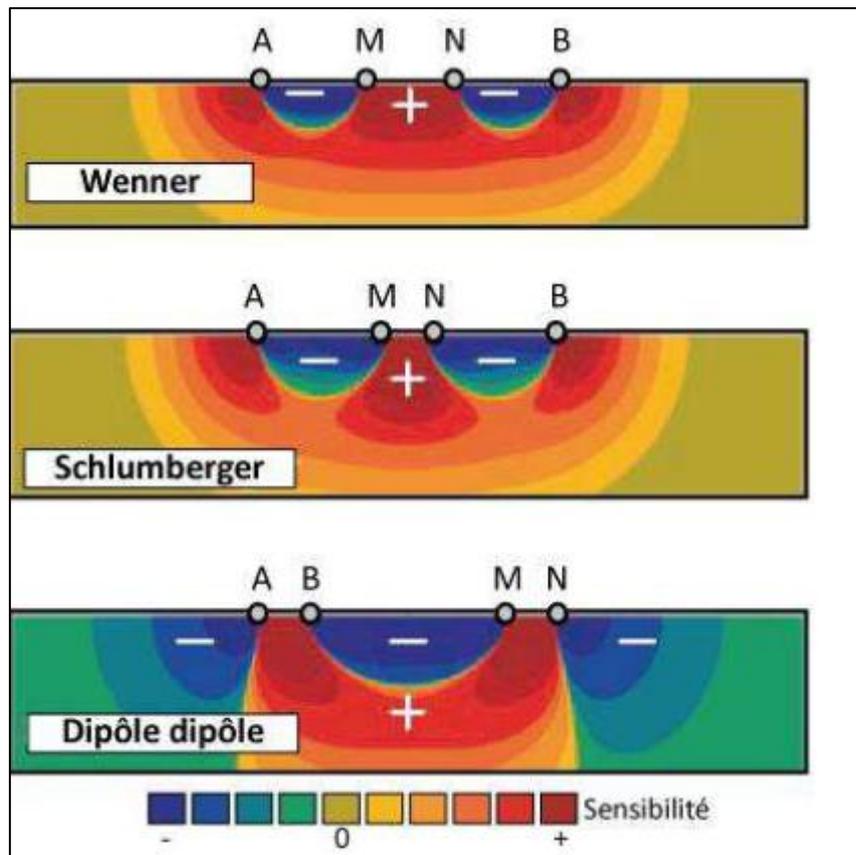


Figure 10: Sensibilité des dispositifs Wenner, Wenner Schlumberger et dipôle dipôle [12]

2-4- Sondages électriques :

Le sondage électrique est une méthode d'exploration du sous-sol qui repose sur la mesure de la résistivité électrique ρ (en $\Omega \cdot m$). Celle-ci caractérise la capacité du courant électrique à circuler dans le milieu naturel : sa connaissance permet d'appréhender la structure et la lithologie du sous-sol. L'injection d'un courant d'intensité connue et la mesure de la distribution du potentiel électrique, nous donnent une estimation de la résistivité apparente (ρ_a) du sous-sol.

La mise en œuvre de cette méthode sur le terrain peut notamment se faire sous la forme de sondages électriques ou de tomographies de résistivité électrique (Figure 11).

Le sondage de résistivité électrique permet de mesurer la distribution des résistivités sur une verticale. Il est réalisé avec des quadripôles d'électrodes, composés de deux électrodes d'injection et deux électrodes de mesure. Le dispositif reste centré sur le même point et les dimensions du quadripôle sont progressivement augmentées afin d'augmenter la profondeur d'investigation. Ainsi, les courants pénètrent de plus en plus profondément dans le sol et traversent des couches de plus en plus profondes. La résistivité électrique apparente est alors affectée par un nombre de plus en plus grand de couches géoélectriquement différentes. Le sondage permet de mettre en évidence les changements des propriétés électriques du sol sur une verticale (Figure 11) [12] .

Cette méthode n'est valable que lorsque les variations latérales de résistivité sont faibles sur la longueur du dispositif déployé.

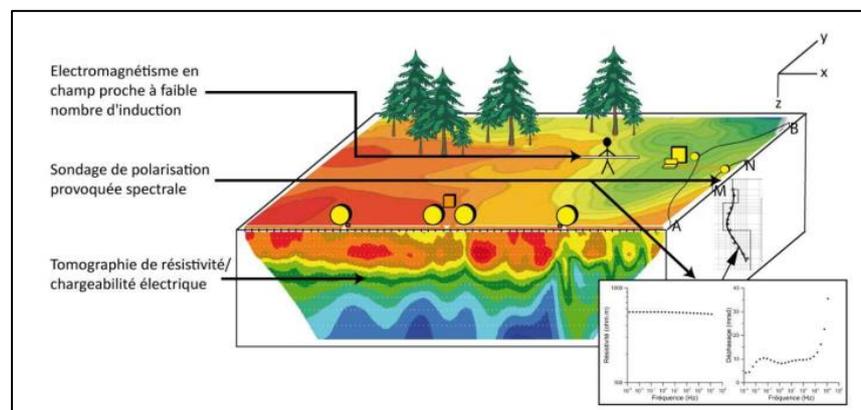


Figure 11: Méthodes géophysiques employées : cartographie d'électromagnétisme en champ proche à faible nombre d'induction ; sondage de polarisation provoquée spectrale ; tomographies de résistivité et de chargeabilité électrique[12]

2-5- Tomographie électrique:

La tomographie électrique est une méthode qui consiste à mesurer la résistivité électrique du sol en déployant un système de multi électrodes le long d'un ou plusieurs profils.

Le traitement des données acquises permet de donner une image de la distribution de la résistivité électrique ou section électrique 2D ou 3D.

La tomographie de résistivité électrique est une méthode géophysique non destructive permettant de construire un panneau 2D vertical de résistivité électrique d'un sol. Cela passe par la réalisation de plusieurs étapes :

1. Construction d'une pseudo-section en résistivités apparentes : un ensemble d'électrodes sont alignées sur un même axe et espacées d'un intervalle constant, appelé espace inter-électrode, noté a . Classiquement, les pseudo-sections sont construites avec 24, 48 ou 72 électrodes. Chacune des électrodes peut servir à l'injection du courant ou à la mesure du potentiel. La programmation d'une séquence de mesure permet de changer les quadripôles d'acquisition et de mesurer une valeur de résistivité apparente pour chaque point d'une maille (Figure 12). La résolution diminue lorsque la profondeur d'investigation augmente. Le quadripôle de mesure est moins sensible aux variations de résistivité en profondeur

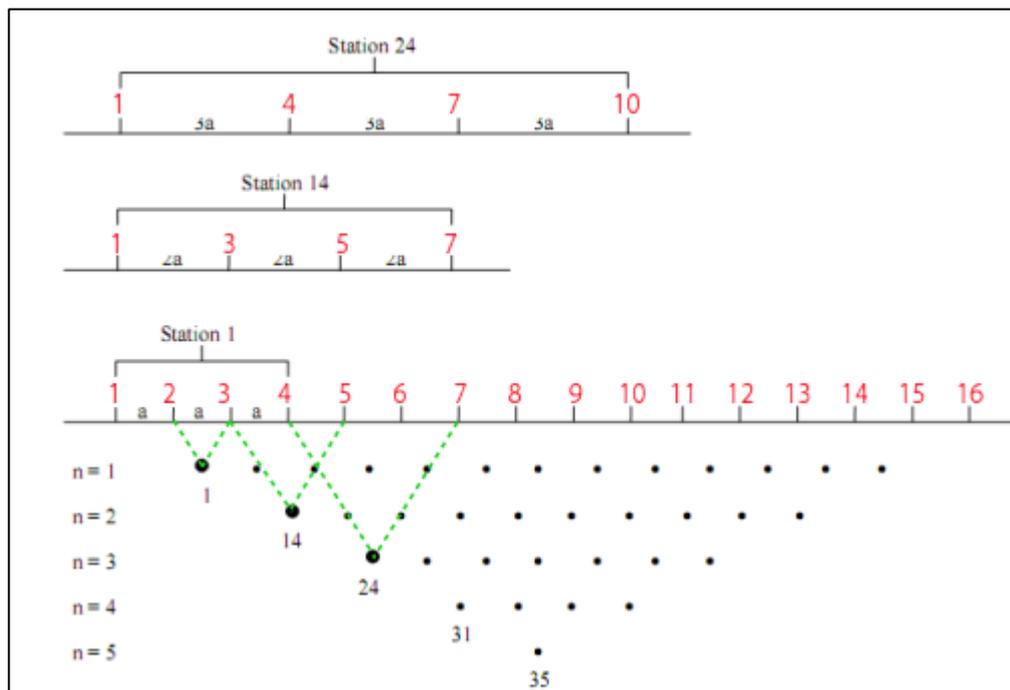


Figure 12 : Principe de construction d'une pseudo-section pour la configuration Wenner [13]

2. L'inversion des données de résistivité apparentes permet de proposer un modèle de résistivité vraie et de calculer l'erreur moyenne associée. Ici, les inversions seront faites avec le logiciel Res2DInv©. Les panneaux de tomographie de résistivité électrique (TRE) obtenus présentent une distribution de la résistivité vraie supposée dans un plan 2D vertical.

3. La résistivité vraie est calculée selon un maillage de type éléments finis. La résistivité vraie est renseignée sur 10 niveaux dont les profondeurs dépendent des méthodes d'inversions employées. Les images des panneaux TRE sont construites par interpolation linéaire des données de résistivités vraies passées en logarithme décimal.[13] .

2-6- Mesure à la boite :

La boîte de sol est utilisée pour les tests de laboratoire de résistivité du sol afin de déterminer la résistivité moyenne du sol à une profondeur égale à l'espacement entre les électrodes (Soil Pins). La boîte de sol est construite en plexiglas transparent et comporte des broches de potentiel amovibles en laiton et des plaques de courant en acier inoxydable. Elle peut être utilisée pour les méthodes d'essai à 4 électrodes ou à 2 électrodes. Il y a quatre fils intégrés qui se connectent aux fils de connexion pour la Soil-Box. La boîte à sol est disponible individuellement ou en tant que composant inclus dans le kit de test de résistivité des sols



Figure 13 : boite de sol

1-Objectif :

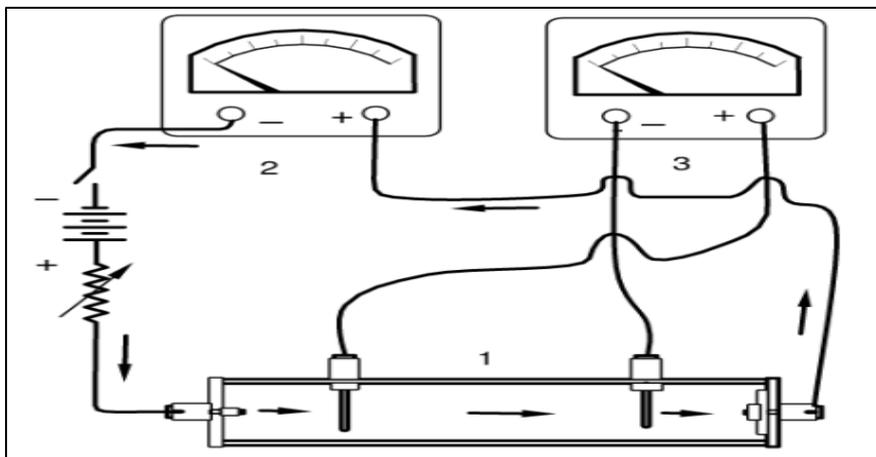
Mesure de la résistivité électrique (en ohm-centimètre) d'un liquide ou de la terre, du sable ou de toute autre matière particulaire qui peut être tassée dans la boîte à sol.[14] .

2-Équipement requis :

1-Boîte de sol de mesuré la résistivité

2-Appareil de mesure de la résistance à 4 bornes ou toute combinaison d'ampèremètre et de voltmètre avec une alimentation électrique.

3-Quatre fils de test isolés pour boîte à sol



Ou :

- 1 : boîte de sol
- 2 : ampèremètre
- 3 : voltmètre

Figure14 : schéma représentatif du branchement de la boîte de mesure[14] .

3-Procédure :

1) Versez ou tassez le matériau à tester dans la boîte à sol jusqu'à ce qu'il soit de niveau avec le

a) Si le matériau à tester est de la terre, retirez les deux broches de potentiel en laiton. Après avoir retiré les goupilles, remplissez la boîte de terre avec la terre. Lors du remplissage de la boîte, le compactage est très important pour obtenir des résultats précis. Assurez-vous que le compactage dans la boîte ressemble à celui de l'endroit où l'échantillon a été prélevé (voir ASTM G-57 pour la procédure correcte). Remettez les goupilles en laiton en place

b) Si le matériau testé est un liquide, versez l'échantillon liquide dans la boîte jusqu'à ce que celle-ci soit remplie. Pour s'assurer que la boîte est entièrement remplie, assurez-

vous que le bas du ménisque formé par le liquide est entièrement au niveau du haut de la boîte. Si la boîte n'est pas toujours remplie au même niveau, des inexactitudes se produiront.

2) Connectez les quatre accessoires des fils de test pour la boîte à sol MCM comme indiqué dans le schéma ci-dessous. (Les fils sont étiquetés C1, C2, P1 et

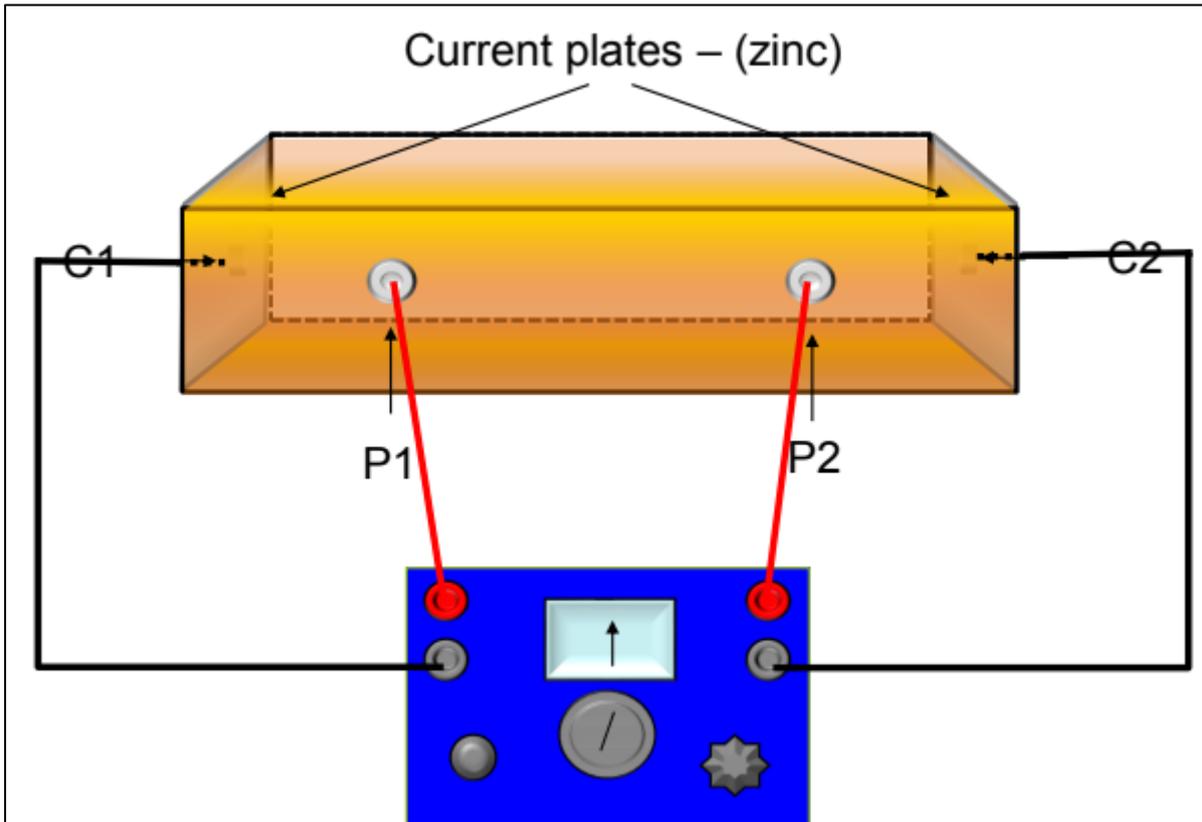


Figure 15: 4-Electrode : Mesure de la résistance du sol ou d'un liquide par l'intermédiaire d'une boîte à électrolyte[14] .

3) Les deux broches extérieures de la boîte à sol doivent être reliées au compteur de résistance par les bornes C1 et C2. (Voir le schéma ci-dessus)

4) Les deux broches intérieures de la boîte de sol doivent être connectées au compteur de résistance via les bornes P1 et P2.

5) Une fois toutes les connexions effectuées, la valeur de la résistance peut être lue sur le compteur en ohms (voir la section ci-dessous intitulée "Conversion de la résistance en résistivité") afin de convertir la lecture de la résistance en une valeur de résistivité.[14] .

.Remarques :

La résistivité des liquides et des sols est fonction de la température. Afin d'obtenir des résultats qui correspondent le mieux aux conditions sur le terrain, l'échantillon doit être à la même température que sur le site d'essai. La résistivité des sols est également fonction de la teneur en humidité ; par conséquent, tous les échantillons de sol doivent être conservés sous un couvercle étanche et mesurés dès que possible après avoir été retirés de leur contenant. Pour de plus amples spécifications, se référer à la procédure ASTM G57.

Les boîtes à sol doivent être soigneusement nettoyées à l'eau distillée après chaque utilisation.

La boîte à sol peut également être utilisée avec des combinaisons voltmètre/ampèremètre avec une alimentation électrique[14] .

4-Conversion de la résistance en résistivité :

4-1- Dimensions critique de la boîte à sol :

Les boîtes à sol sont conçues de manière à ce que la surface de la section transversale de l'échantillon (A), avec la boîte remplie à ras bord, divisée par la séparation entre les broches (L) soit égale à 1 cm.

➤ Petite boîte à sol :

$$\text{Section transversale} = 3\text{cm} \times 2,4\text{cm} = 7,2\text{cm}^2.$$

$$\text{Séparation des broches} = 7,2\text{cm}$$

$$A/L = 1\text{cm}$$

➤ Grande boîte à terre:

$$\text{Section transversale} = 4\text{cm} \times 3,2\text{cm} = 12,8\text{cm}^2.$$

$$\text{Séparation des broches} = 12,8 \text{ cm}$$

$$A/L = 1\text{cm}$$

4-2--Détermination de la résistivité se l'échantillon :

En supposant qu'une variation du courant traversant l'échantillon (ΔI) entraîne une variation de la tension chutant aux bornes des broches de ΔV , la résistance de l'échantillon serait de

$\Delta V/\Delta I$ et les unités seraient Ω , en supposant que le courant soit en Ampères et la tension en Volts (ou que le courant soit en milliampères et la tension en milli-volts).

Puisque, Résistivité = Résistance x (A/L), et puisque A/L est de 1cm pour les boîtes de sol
Résistivité de l'échantillon ($\Omega.cm$) = Résistance mesurée (Ω) [14] .

3

Troisième Chapitre

Partie expérimentale

—²

1- Introduction :

Le 31 mai 2021 nous avons entrepris la partie expérimentale de notre projet, qui consiste à mesurer la résistance et trouver la relation entre les propriétés étudiées dans le premier chapitre et essayé de remarquer les liens entre résistivités électriques et les paramètres physique du sol, en ayant déjà au préalable des résultats d'essais géotechniques en laboratoire.

Dans cette étude, nous avons utilisé une boîte à sol connectée à un générateur, un voltmètre et ampèremètre pour mesurer la résistance au moyen d'un courant continu. Il a été utilisé pour des mesures de résistance Nous avons testé sept (07) échantillons de sols de différentes profondeurs que nous avons obtenus à partir d'un forage carotté, puis nous avons conservé pendant plus de 24 heures dans une pièce à température et humidité modérées. Le tableau suivant montre les échantillons testés avec la nature et la profondeur de chaque échantillon :

echantillon	nature	prof
1	tuff	1,5
2	sable limoneux argileux	2,5
3	sable fin peu limoneux	3,5
4	sable consolidé	12,5
5	sable argileux limoneux roux	17
6	sable fin	17
7	argile sable limoneux	18,5

Tableau 4 : les échantillons et leur nature et leur profondeur

La résistivité électrique d'un échantillon de sol dans cette configuration est la suivante :

$$\rho = R \cdot A / a$$

Où R est la résistance électrique mesurée entre les deux électrodes internes en ohms. (Ω), « A » est la section transversale de l'échantillon de sol en cm^2 et « a » est la distance entre les électrodes internes en centimètres. Électrodes internes en cm. Pour la boîte à sol utilisée, la distance entre les électrodes internes est de 12,8 cm et la section est de 12,8 cm^2 . La section transversale est de 12,8 cm^2 , donnant une section transversale/longueur (a/a) de 1 cm. Pour cette configuration, l'amplitude de la résistance électrique mesurée (R) en est la même que

l'amplitude de sa résistance électrique (Ω). Sa résistance électrique (ρ) est en $\Omega.cm$. Pour assurer la cohérence des mesures et le contrôle des paramètres tels que la porosité, la teneur en eau et le degré de saturation. dans cette étude, nous avons utilisé une combinaison d'ampèremètre et de voltmètre avec la source d'alimentation, comme le montre les photos ci-après où l'expression de la résistance est la suivante :

$$R = \frac{V}{I}$$

Avec :

V : le potentiel en volt (V)

I: l'intensité du courant en ampère (μA).

Les matériels qui sont utilisé pour ce projet :

1- La boite de sol :



2- Un générateur :



3- Un voltmètre :



4- Un ampèremètre :



5- Quatre fils de test isolés pour boîte à sol :



6- Déficients des échantillons :



Après avoir respecté les conditions appropriées de mesure d'humidité, de température et de conservation, nous avons installé les moyens comme suit :



Figure16 : Configuration de la mesure de résistivité

Ou :

Le voltmètre qui mesure le tension(v) et ampèremètre qui mesure l'intensité (μA) et générateur qui donne le courant électrique

2- Réalisation des mesures et résultats :

Après avoir mesuré l'intensité du courant et la tension, nous avons calculé la résistance en utilisant la relation précédente et en ajustant les unités. Nous avons obtenu le résultat final de la résistivité pour chaque échantillon et résumé les résultats dans le tableau suivant :

echantillon	nature	prof	V (v)	I(μa)	R(Ω)	$\rho(\Omega\text{m})$	
1	tuff		1,5	0,053	16,6	3192,77108	31,9277108
2	sable limoneux argileux		2,5	0,025	1,9	13157,8947	131,578947
3	sable fin peu limoneux		3,5	0,113	16,1	7018,63354	70,1863354
4	sable consolidé		12,5	0,227	0,3	756666,667	7566,66667
5	sable argileux limoneux rougatre		17	0,02	1,7	11764,7059	117,647059
6	sable fin		17	0,425	7,1	59859,1549	598,591549
7	argile sable limoneux		18,5	0,036	1,5	24000	240

Tableau 5 : le résultat final de résistivité de chaque échantillon

3- Résultats des essais géotechniques en laboratoire

Des échantillons ont été pris du sondage carotté de mêmes profondeurs que les échantillons pris pour les mesures de résistivité a la boite. Ils ont été transportés et préservés dans une chambre humide, puis des essais géotechniques en laboratoire ont été réalisé sur ces échantillons selon les normes géotechniques européennes NFP et ASTM dont les résultats sont récapitulés dans le tableau ci-après que certains d'eux nous ont servir pour comparer ou faire des calculs :

Réf ére nce Son dag e	Profonde ur (m)	Paramètres physiques					Limite d'Atterbe rg		Analyse granulom étrique		Cisaillement à la boite UU		Essai Oedométrique			Analyse chimique du sol			Analyse chimique de l'eau		
		W (%)	γ_d (t/m ³)	γ_h (t/m ³)	Sr (%)	\emptyset (%)	WL (%)	Ip (%)	< 2mm	< 80 μ	Cu (bars)	ϕ (°)	Cc (%)	Pc (bars)	Cg (%)	Sulfat es (mg/kg)	Chlorur es (%)	Ph	Sulfat es (mg/l)	Chlo rure s (mg/l)	Ph
SC-01	00,20 - 00,50										0,64	20,9	11,6	1,02	0,66						
	01,50 - 02,10															2554	0,24	7,3			
	02,00 - 02,10																				
	02,40 - 03,00	12,07	1,86	2,09	75,31	29,81				12						2307	0,21	7,9	272	383	7,1
	12,00 - 13,00	14,42	2,02	2,31	100,00	23,77				8											
	17,40 - 17,70	14,29	1,92	2,20	99,60	27,55	31	13	84	32	0,62	22,5	8,30	1,48	0,89						
	18,50 - 19,50	13,60	2,02	2,30	100,00	23,77	31	13	79	26											

Tableau 6 : résultats des essais en laboratoire

4- Comparaison paramètres physique, mesures de résistivité :

4-1- Relation résistivité teneur en eau

Les échantillons des sols ont été gardé plus de dix (10 jours) dans endroit plus ou moins sec, afin d'obtenir une teneur en eau pondérable de 0%, On le place ensuite dans la boite de mesure pour prendre la différence de potentiel (V) en injectant un courant (I).

Dans cet essai, nous avons procédé l'humidification progressive de l'échantillons traité, accompagné d'une mesure de résistivité pour chaque teneur en eau ainsi obtenu par la formule suivante :

$$w\% = \frac{m_h - m_s}{m_s} \cdot 100$$

m_h : est la masse de l'échantillon humide.

m_s : est la masse de l'échantillon sec

Chaque ajout d'eau à l'échantillon est mélangé dans un récipient afin d'homogénéiser l'humidité globale de l'échantillon.

Le fluide d'imbibition été préparé au laboratoire en mélangeant une quantité de bentonite avec une eau distillé, puis nous avons mesuré la résistivité de ce dernier a l'aide de notre boîte de mesure et nous avons trouvé une valeur cohérente $\rho_w = 2.36 \Omega.m$

Les résultats de cette expérience sont résumés dans le tableau et la figure ci-après :

Echantillon 12.5m (sable grésifier)

W(%)	0	4,58	9,17	13,76	18,34	22,93	27,52	32,11	36,69	41,28
$\rho(\Omega.m)$	9900	1150	73	33	16,9	12,9	11,1	8,3	6,25	5,6

Echantillon 18.5m (sable grésifier)

W(%)	0	11,41	17,12	22,83	28,53	34,24	39,95	45,66
$\rho(\Omega.m)$	3580	38,2	17,7	10,86	8,14	6,53	5,04	4,92

Echantillon 17.5m (Argile limoneuse)

W(%)	0	13,85	17,26	33,73
$\rho(\Omega.m)$	3500	8,7	5,2	3,16

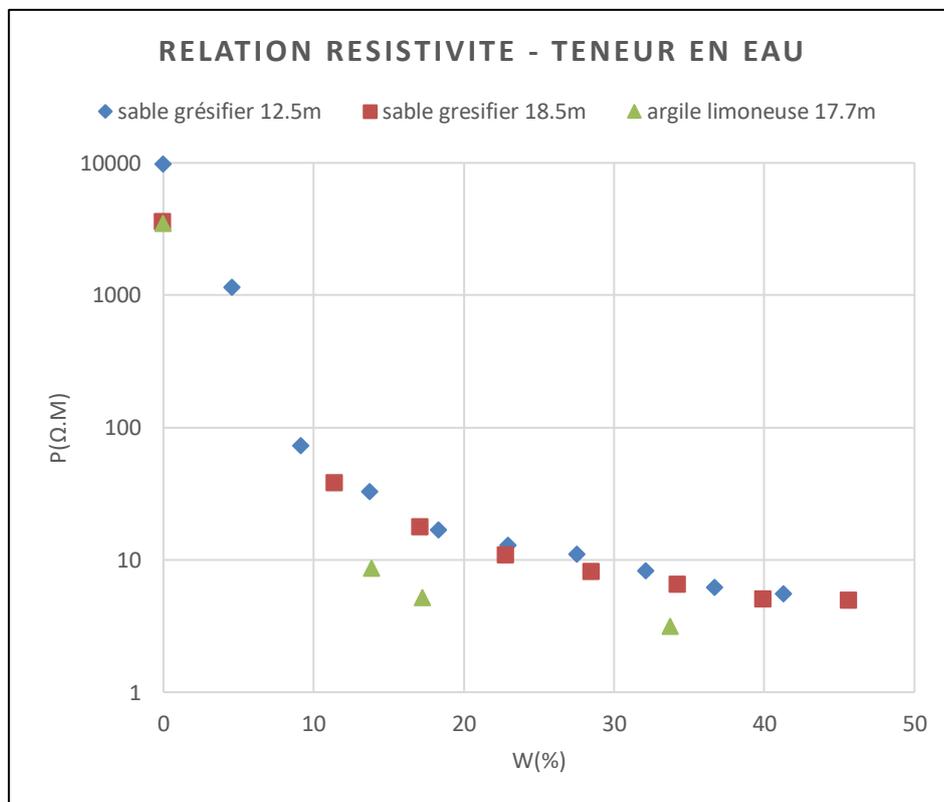


Figure 17 : représentation de la résistivité du mélange (roche-eau) en fonction de la teneur en eau du mélange

D'après les résultats obtenus on remarque que la résistivité est inversement proportionnelle à la teneur en eau. La résistivité diminue suivant une courbe exponentielle par rapport à l'augmentation de la teneur en eau. Aussi nous remarquons que le point d'inflexion de la courbe des argiles correspond à une basse résistivité par rapport aux sables grésif, cela de la faite que grains de sable sont pus résistants.

4-2- Relation résistivité porosité

Dans le cas d'une roche saturée, « ARCHIE » a établi une relation expérimentale liant la résistivité de la roche ρ_r à la porosité et à la résistivité de l'eau d'imbibition.

$$\rho_r = \rho_w a \phi^{-m}$$

ρ_w = résistivité de l'eau d'imbibition ;

ϕ = porosité ;

a = facteur qui dépend de la lithologie et qui varie entre 0.6 et 2 ($a < 1$ pour les roches à porosité intergranulaires et $a > 1$ pour les roches à porosité de fracture) ;

m = facteur de cimentation (Il dépend de la forme des pores, de la compaction et varie entre 1,3 pour les sables non consolidés à 2,2 pour les calcaires cimentés).

On peut regrouper sous le terme de **facteur de formation** $F = a \phi^{-m}$.

Dans la pratique on admet pour les formations meubles, sables et grès, la formule de «HUMBLE» : $F = 0,62 \cdot \phi^{-2,15}$ et pour les roches bien cimentées: $F = 1 \cdot \phi^{-2}$

Dans notre cas (formations meubles), nous aurons

$$\phi = \sqrt[2,15]{\frac{F}{0,62}} \quad \text{Avec} \quad F = \frac{\rho_r}{\rho_w}$$

Telle que ρ_r est la résistivité de la formation (mélange eau-formation).

ρ_w est la résistivité de l'eau d'imbibition.

Les calculs des porosités sont faits à partir des résistivités mesurées précédemment par l'ajout d'une quantité d'eau d'une résistivité connue (2.36 $\Omega.m$).

Echantillon 12.5m (sable grésif)

$\rho(\Omega.m)$	9900	1150	73	33	16,9	12,9	11,1	8,3	6,25	5,6
\emptyset (%)	1,65	4,50	16,23	23,47	32,05	36,34	38,97	44,61	50,90	53,57

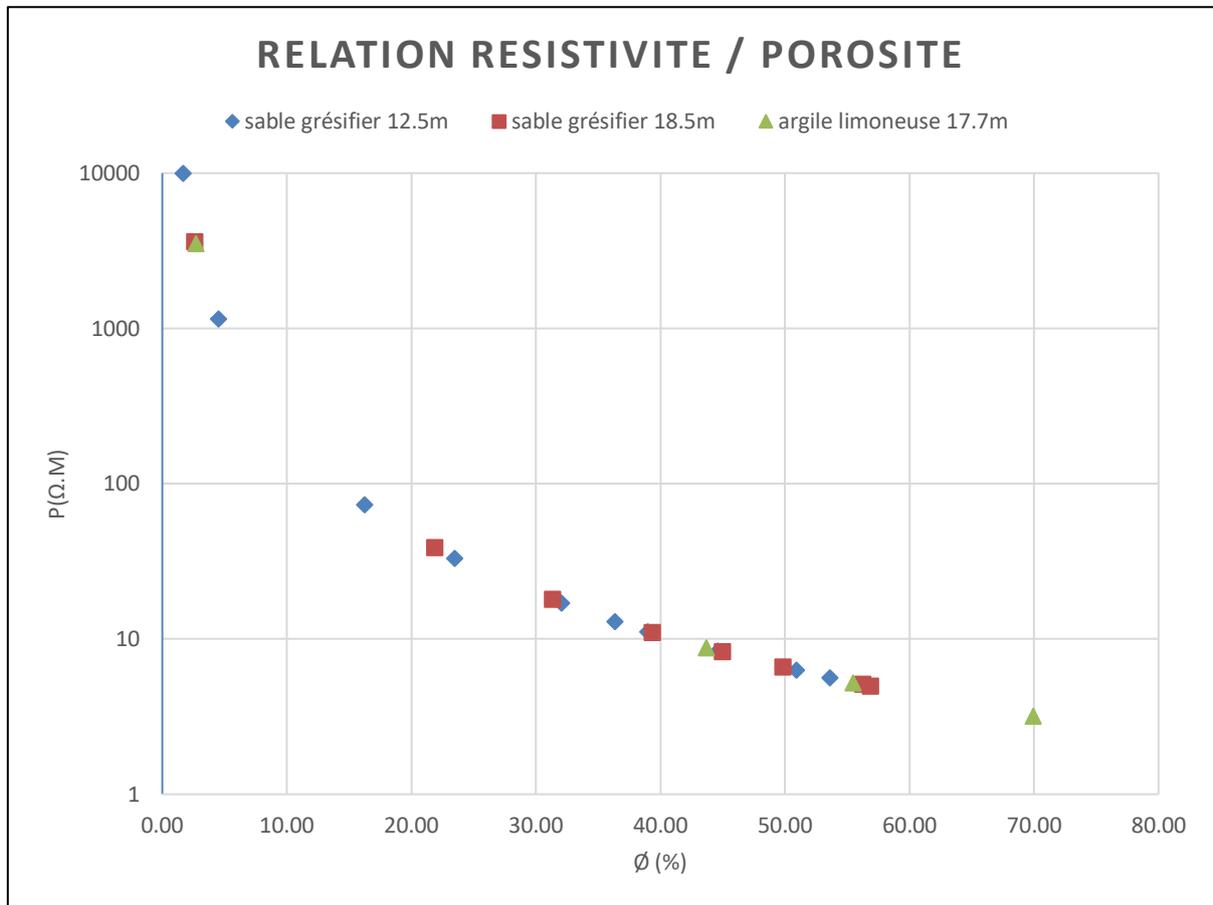


Figure 18 : représentation de la résistivité du mélange (roche-eau) en fonction de la porosité calculée

D’après les résultats obtenus on remarque que la résistivité est inversement proportionnelle à la porosité. La résistivité diminue suivant une courbe exponentielle par rapport a l’augmentation de la porosité.

5- Discussions des résultats

Les mesures faites a la 2eme phase de la partie expérimentale (mesure de la résistivité a l'humidification progressive) ont permet d'établir des relations a partir des graphes des mesures. Et si nous projetons les valeurs des résistivités mesurées a la première phase sur ces graphes nous devons avoir des paramètres (Teneur en eau, porosité) des échantillons a leurs états réels qui devrait correspondre aux valeurs des essais géotechnique en laboratoire, mais les valeurs ne correspondent pas vraiment, cela est dû aux conditions de préservations des échantillons qui ne sont pas les mêmes.

Conclusion générale :

Les méthodes géophysiques, qui sont des méthodes non destructives et indirectes, prennent une place dans les études de la proche surface comme le génie civil, le domaine minier, l'environnement et autres.... Parmi ces méthodes ; la méthode électrique qui montre des résultats promettants.

Les paramètres physiques des sols influencent d'une façon importante sur la variation de la résistivité électrique, donc la mesure de résistivité électrique peut nous renseigner sur certains paramètres su sol investigué comme la teneur en eau, la porosité, la saturation en eau, la densité et autres.....

Les mesures à la boite nous ont permis de connaitre directement la résistivité des échantillons prélevés a des profondeurs bien précis selon l'objectif, aussi nous ont permis de suivre les variations des résistivités électriques en fonction des variations de certains paramètres physiques.

Nous remarquons à partir des mesures faites au laboratoire que la résistivité électrique est inversement proportionnelle à la teneur en eau et la porosité. Nous avons mesuré la résistivité des échantillons a soi-disant leurs états naturels et nous avons comparé les valeurs des paramètres physique (teneur en eau, porosité) calculés à partir des mesures des résistivités, et ceux obtenues par des essais géotechniques en laboratoire ; nous avons constaté une différence entre les résultats cela est dû probablement aux conditions de préservations des échantillons différentes.

Vu les bons résultats obtenus à la comparaison des mesures de la teneur en eau et le calcule à partir de la résistivité nous considérons que les mesures de ce paramètres restent fiables par la détermination des résistivité par la boite.

Les références :

- [1]. Nsanzimfura, T. (2015). Etude de la densité apparente et de la porosité du sol dans le dispositif expérimental crop-news de Kamboinse (Burkina Faso). Mémoire Master en Ingénierie de l'Eau et de l'Environnement (IRH), 43.
- [2]. Chalikakis, K. (2006). Application de méthodes géophysiques pour la reconnaissance et la protection de ressources en eau dans les milieux karstiques. Université Pierre et Marie Curie-Paris VI..
- [3]. Taylor, G. S. (1960). Drainable porosity evaluation from outflow measurements and its use in drawdown equations. Soil science, 90(6), 338-343
- [4]. SHOUT, H. POLYCOPE DE GEOPHYSIQUE S4.
- [5]. Abdelfettah, Y. (2009). Inversion conjointe des données magnétotelluriques et gravimétriques: Application à l'imagerie géophysique crustale et mantellique. Université de Bretagne occidentale-Brest.
- [6]. MAHAMMED, D. M. (2012). UTILISATION DES DISPOSITIFS DE GEOPHYSIQUE ELECTRIQUE NON CLASSIQUES POUR L'ETUDE DES COUCHES GEOLOGIQUES PROFONDES: CAS DES CHOTTS EL GHARBI ET CHERGUI. Université d'Oran2 Mohamed ben Ahmed.
- [7]. Krivochieva, S. (2002). Application des méthodes électromagnétiques transitoires à la prospection des aquifères profonds. École polytechnique.
- [8]. Hacini, Y. (2006). Application des méthodes géophysiques à l'étude de deux sites (Kappelen et Grenchen) de l'aquifère poreux complexe du Seeland. Université de Lausanne, Faculté des géosciences et de l'environnement.
- [9]. Chapellier, D. (2001). Prospection électrique de surface. cours oneline de géophysique de l'Université de Lausanne, Suisse.
- [10]. Chouteau, M. (2001). Méthodes électriques, électromagnétiques et sismiques. Géophysique appliquée II GLQ 3202. Notes de cours.
- [11]. Zidane, Z. A. (2018). Modélisation et simulation des prises de terre dans les systèmes électrique.
- [12]. Blondel, A. (2014). Développement des méthodes géophysiques électriques pour la caractérisation des sites et sols pollués aux hydrocarbures. Université Michel de Montaigne-Bordeaux III.
- [13]. SIVELLE, V. Master Sciences de la Terre, Environnement, Ecologie Spécialité Génie Géologique, Génie Civil et Environnemental (3GCE).
- [14]. International, A. (2012). Standard test method for field measurement of soil resistivity using the Wenner four-electrode method: ASTM International.