

SOMMAIRE

Dédicaces.....	i
Résumé.....	iii
Sommaire.....	vi
Liste des figures.....	vii
Liste des tableaux.....	viii
 INTRODUCTION GENERALE	 1
 Chapitre I : Mesure de la résistivité	 3
I.1. Mise à la terre.....	3
I.3. Les risques liés aux courants électriques :.....	6
I.4. Résistivité du sol	9
I.5. Méthodes de mesure de résistivité	13
I.5.a. Technique de mesure : [3].....	13
I.5.b. Méthode de Wenner :.....	15
I.6. Résistivités de quelques milieux	19
Chapitre II : Formulation de la méthode de WENNER	20
II.1. Principe du sondage électrique.....	21
II.2. Principe de calcul :.....	22
II.3. Le sondage électrique.	23
II.4. Trainée Electrique.....	25
II.5. Dispositifs d'électrodes.....	28
Chapitre III : CONCEPTION RESULTATS ET TESTS.....	30
III.1. Schéma bloc :	30
III.2. Source de courant	30
III.3. La mesure de tension	35
Conclusion générale.....	41
Références Bibliographies.....	42

LISTE DES FIGURES

Figure 1: Dispositifs Différentiels Résiduels – DRR [1]	3
Figure 2: Principe du DDR [2]	5
Figure 3: Zones temps/courant des effets des courants alternatifs (15 Hz à 100 Hz) sur des personnes. [2].....	7
Figure 4: Origine des incendies dans les bâtiments. [2].....	9
Figure 5: Mise en place de la prise de terre [1]	10
Figure 6: Résistance en fonction de profondeur [1].....	11
Figure 7: Technique Schlumberger.....	13
Figure 8: Technique Dipôle-dipôle.....	13
Figure 9: Technique Pôle-dipôle	14
Figure 10: Technique Pôle-pôle	14
Figure 11: Technique Tomographie.....	14
Figure 12: Technique WENNER.....	15
Figure 13 : Disposition des électrodes selon la méthode de Wenner [1]	16
Figure 14: Mesure de la résistivité [4]	17
Figure 15: Source de courant et mesure de tension [6]	21
Figure 16: Propagation des ondes en profondeur [6]	22
Figure 17: Résistive ($\rho_1 < \rho_2$) [6].....	24
Figure 18: Résistive ($\rho_1 < \rho_2$) [6].....	24
Figure 19: Montage de Wenner [6].....	25
Figure 20: Direction du courant [6]	28
Figure 21: Positionnement des électrodes	29
Figure 22: Synoptique du dispositif.....	30
Figure 23: Circuit de la source de courant	32
Figure 24: Au borne du pin 2 du XR 2206.....	34
Figure 25: XR 2206 et TL 081	34
Figure 28 : Photo de tension d'alimentation.....	37
Figure 29 : Amplificateur de tension	38
Figure 32 : Fiche Technique et Identification du.....	40

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 1 : Valeurs maximales de la prise de terre en fonction du courant assigné du DDR [1].....	5
Tableau 2 : Résistivité en fonction de la nature du terrain [1].....	13
Tableau 3 : Résistivité de différentes eaux domestiques. [5]	20
Tableau 4 : Résistivité de différentes eaux non domestiques [5]	20
Tableau 5 : Résistivité de quelques matériaux [5]	21
Tableau 6 : Composants électriques et leurs valeurs.....	34

Introduction Générale

INTRODUCTION GENERALE

La nécessité de connaître les différentes roches dans une région du sous-sol, surtout dans les explorations des hydrocarbures et des eaux, ont induit ces dernières décennies, une mobilisation importante de méthodes et de moyens de prospection de plus en plus performants. Les méthodes existantes sont nombreuses, nous pouvons citer :

- Le sondage électrique
- La prospection magnétique
- La prospection électromagnétique
- La prospection gravimétrique
- La prospection sismique

La prospection sismique regroupe deux méthodes ; la sismique réflexion qui utilise la réflexion des ondes sur les interfaces entre plusieurs niveaux géologiques, et la sismique réfraction qui utilise la propagation des ondes le long des interfaces entre les niveaux géologiques.

Dans notre travail nous avons étudié une autre technique de prospection qui est le sondage électrique. C'est une méthode d'investigation verticale ayant pour but d'évaluer l'aptitude des matériaux à laisser passer le courant électrique continu ou de faible fréquence. Elle repose, donc sur la mesure de la résistivité électrique ρ (en $\Omega.m$). 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.

Dans toute installation domestique et industrielle, le raccordement d'une prise de terre est une des règles de base à respecter pour garantir la sécurité du réseau électrique. L'absence de prise de terre peut entraîner de réels dangers pour la vie des personnes et la mise en péril des installations électriques et des biens. Cependant, cette seule disposition ne suffit pas à garantir une sécurité totale. Seuls des contrôles réguliers peuvent attester du bon fonctionnement de l'installation électrique. De nombreuses méthodes de mesure de terre existent en fonction du type de régimes de

INTRODUCTION GENERALE

neutre, du type d'installation (domestique, industrielle, milieu urbain, campagne, etc.), de la possibilité de mise hors-tension, etc. L'une des méthodes les plus utilisées pour la mesure des résistivités des terres est la méthode de Wenner

Le mémoire est structuré en trois chapitres :

Le premier chapitre donne un aperçu sur les différentes méthodes de sondage pour la résistivité des différents sols pour des applications géotechniques et électrotechniques.

Dans le deuxième chapitre, nous avons synthétisé la formulation entre de la distribution du potentiel électrique et nous avons mis l'accent sur les équations régissant la méthode de Wenner.

Le troisième chapitre est dédié au développement de l'aspect théorique et pratique, où le principe de la méthode est mis en œuvre à travers deux blocs électroniques qui sont la source de courant sinusoïdal et le circuit de la mesure de la différence de potentiel qui donne accès à la valeur de la résistivité.

Chapitre 1

Mesure de la Résistivité

Avant de réaliser une mesure de terre, la première question fondamentale à se poser est de savoir quelle est la valeur maximale admissible pour s'assurer que la prise de terre est correcte. Les exigences en matière de valeur de résistance de terre sont différentes selon les pays, les régimes de neutre utilisés ou le type d'installation.

Dans une installation, pour garantir la sécurité des personnes, il faut que les dispositifs de protection se déclenchent dès qu'une « tension de défaut » circulant dans l'installation dépasse la tension limite acceptée par le corps humain. Les études réalisées par un groupe de travail composé de médecins et d'experts en matière de sécurité, ont conduit à la détermination d'une tension de contact permanente admise comme non dangereuse pour les individus : 50 V AC pour les locaux secs (cette limite peut être plus faible pour des milieux humides ou immergés). De plus, de façon générale, dans les installations domestiques le dispositif de coupure différentiel (DDR) associé à la prise de terre accepte une élévation de courant de 500 mA.

En utilisant la loi d'Ohm :

$$U = RI \quad (1)$$

On obtient : $R = 50 \text{ V} / 0,5 \text{ A} = 100 \Omega$ (2)

Pour garantir la sécurité des individus et des biens, il faut donc que la résistance de la prise de terre soit inférieure à 100 Ω .

Tableau 1 : Valeurs maximales de la prise de terre
en fonction du courant assigné du DDR [1]

Courant différentiel résiduel maximal assigné du DDR ($I_{\Delta n}$)		Valeur maximale de la résistance de la prise de terre des masses (Ohms)
Basse sensibilité	20 A	2,5
	10 A	5
	5 A	10
	3 A	17
Moyenne sensibilité	1 A	50
	500 mA	100
	300 mA	167
	100 mA	500
Haute sensibilité	$\leq 30 \text{ mA}$	> 500

La prise de terre associée à un dispositif de coupure différentiel évite l'élévation dangereuse du potentiel des masses. Elle contribue ainsi à la protection des personnes qui peuvent entrer en contact avec les masses.

Lorsqu'un courant de fuite apparaît, il est évacué à la terre par la prise de terre. Aussi faut-il que la résistance de la prise de terre ait une valeur limite afin que le potentiel des masses ne puisse atteindre des tensions dangereuses.

I.2. Les Dispositifs Différentiels Résiduels DDR.

Le principe du DDR est illustré sur la figure 2 .La détection de la somme algébrique des courants dans les conducteurs actifs (phases et neutre) est effectuée par un capteur constitué d'un tore qui entoure tous les conducteurs actifs. Un bobinage est réalisé autour du tore de manière à détecter les variations de flux induites par le courant différentiel résiduel. En l'absence de défaut d'isolement, la somme algébrique des courants dans les conducteurs actifs est nulle et le tore n'est soumis à aucun flux. En cas de défaut d'isolement, cette somme n'est plus nulle et le courant de défaut induit dans le tore un flux qui génère un courant dans sa bobine. Ce courant est redressé, filtré et amplifié. Si le signal obtenu est supérieur à un certain seuil, une temporisation est lancée (elle peut être nulle pour une réaction instantanée). Si le défaut est toujours présent à la fin de la temporisation, l'ouverture d'un dispositif de commande est déclenchée. [2]

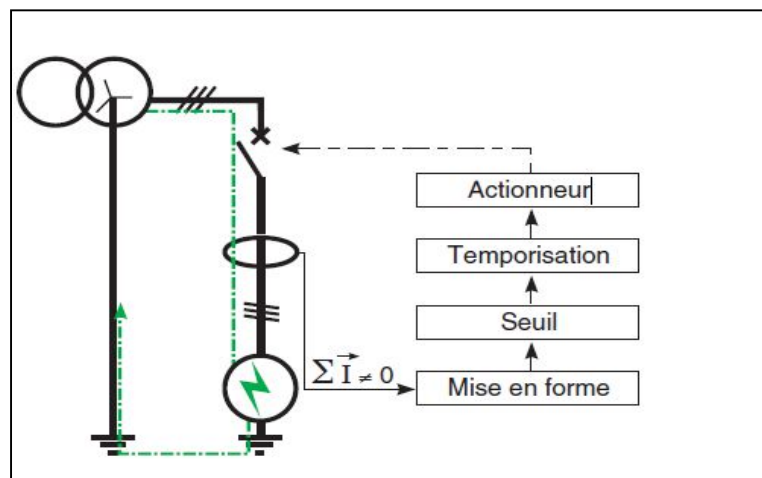


Figure 2: Principe du DDR [2]

I.3. Les risques liés aux courants électriques :

Une personne soumise à une tension électrique est électrisée. Selon l'importance de l'électrisation, cette personne peut subir différents effets physiopathologiques :

- Une sensation désagréable,
- Des contractures musculaires involontaires (tétanisation),
- des brûlures,
- un arrêt cardiaque (c'est l'électrocution).

Ces effets dépendent de différents facteurs :

- Des caractéristiques physiologiques de l'être humain concerné,
- De l'environnement (humide ou sec par exemple),
- Des caractéristiques du courant traversant le corps. Une personne peut subir un choc électrique dans deux circonstances :
 - Par un contact direct : c'est le cas d'une personne qui touche une conductrice nue sous-tension,
 - Par un contact indirect : c'est le cas d'une personne qui touche la carcasse métallique d'un récepteur électrique ayant un défaut d'isolement. Le danger provient du courant électrique, en valeur et en durée, traversant le corps humain et en particulier la région du cœur.

La figure 3 synthétise les résultats des travaux publiés par la Commission Electrotechnique Internationale sur ce sujet (Spécification Technique CEI 60479-1, Ed.4, 2005 : Effets du courant sur l'homme et les animaux domestiques

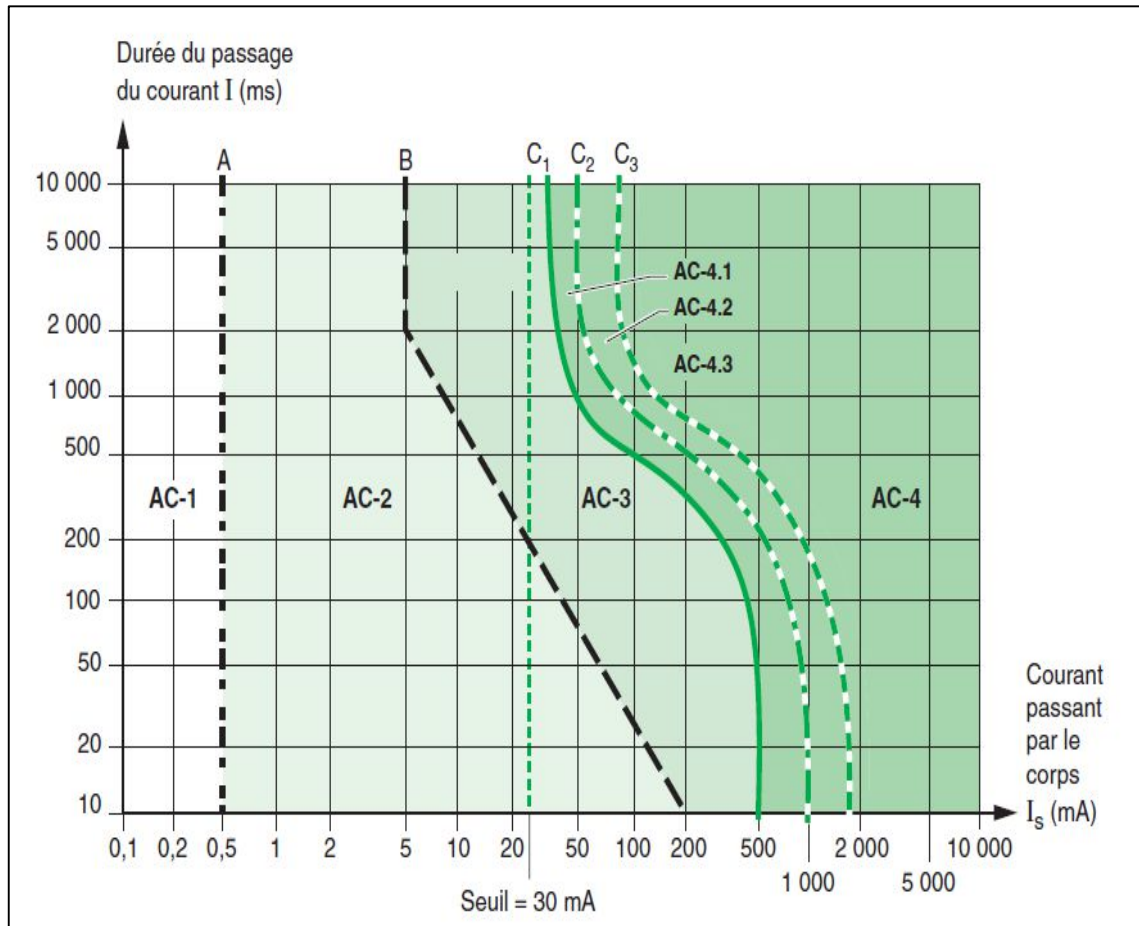


Figure 3: Zones temps/courant des effets des courants alternatifs (15 Hz à 100 Hz) sur des personnes. [2]

- Zone AC-1 : Perception
- Zone AC-2 : Contractions musculaires involontaires
- Zone AC-3 : Difficultés de respiration
- Zone AC-4 : Effets pathophysiologies graves
 - AC-4.1 : risque de fibrillation ventriculaire jusqu'à 5 %
 - AC-4.2 : risque de fibrillation ventriculaire jusqu'à 50 %
 - AC-4.3 : risque de fibrillation ventriculaire supérieur à 50 %

Une étude réalisée dans les années 80-90 en Allemagne par une compagnie d'assurance sur des incendies en milieu industriel et de bureaux, a révélé que l'électricité était à l'origine de plus de 40 % des sinistres.

Bon nombre d'incendies d'origine électrique ont pour origine un échauffement important et ponctuel ou un arc électrique provoqué par un défaut d'isolement. Le risque est d'autant plus important que le courant de défaut est élevé

Il est également fonction du degré de risque d'incendie ou d'explosion propre au local (stockage de matériau inflammable, présence d'hydrocarbures volatils, ...).

A l'origine de nombreux incendies d'origine électrique, on trouve la combinaison de plusieurs facteurs :

- Une installation ancienne,
- La dégradation des isolants,
- Une accumulation de poussière et d'humidité

L'augmentation progressive des courants de cheminement à la surface des isolants pollués et en présence d'humidité produit des étincelages à l'origine de dépôts de carbone en surface. L'évolution de ce phénomène lié à des cycles de condensation en surface et de séchage est très lente. Lorsque le courant de cheminement dépasse 300mA un phénomène d'avalanche se produit, capable d'enflammer les dépôts de carbone qui, à leur tour, pourront provoquer l'inflammation des isolants et des appareils. Il existe un risque réel d'inflammation pour un courant de fuite de 300 mA. Le courant de fuite circule de la source vers les armatures métalliques et ne revient pas à la source par le conducteur de retour.

La figure suivante représente un graphique sous forme de secteur qui résume le pourcentage des différentes causes d'incendie

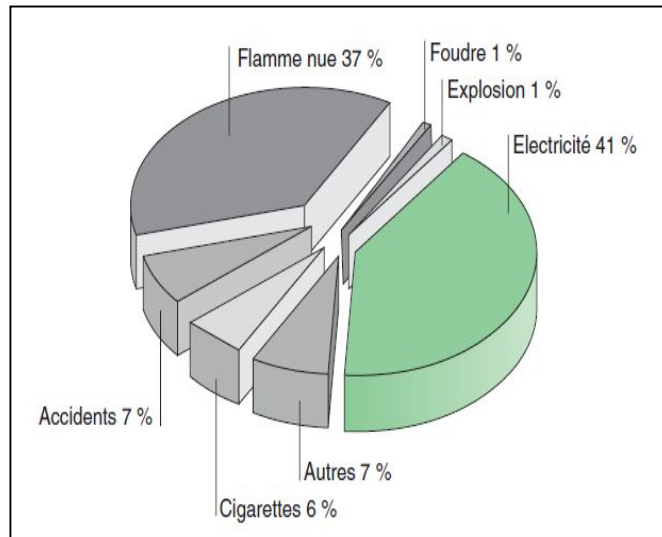


Figure 4: Origine des incendies dans les bâtiments. [2]

I.4. Résistivité du sol

Donc il est bien évident qu'il est très recommandé de faire des études profondes pour l'installation de la mise de la terre. Par ailleurs il est primordial de connaître la résistivité du sol et par conséquent la résistance.

La relation qui relie la résistance avec la résistivité est la suivante :

$$\rho = R S/L \quad (3)$$

ρ : La résistivité du matériau ($\Omega \cdot m$)

R : résistance en ohm (Ω)

S : la section en mètre carré (m^2)

l : longueur en mètre (m)

La prise de terre est en fonction des pays, du type de construction ou des exigences normatives, il existe différentes méthodes pour réaliser une prise de terre.

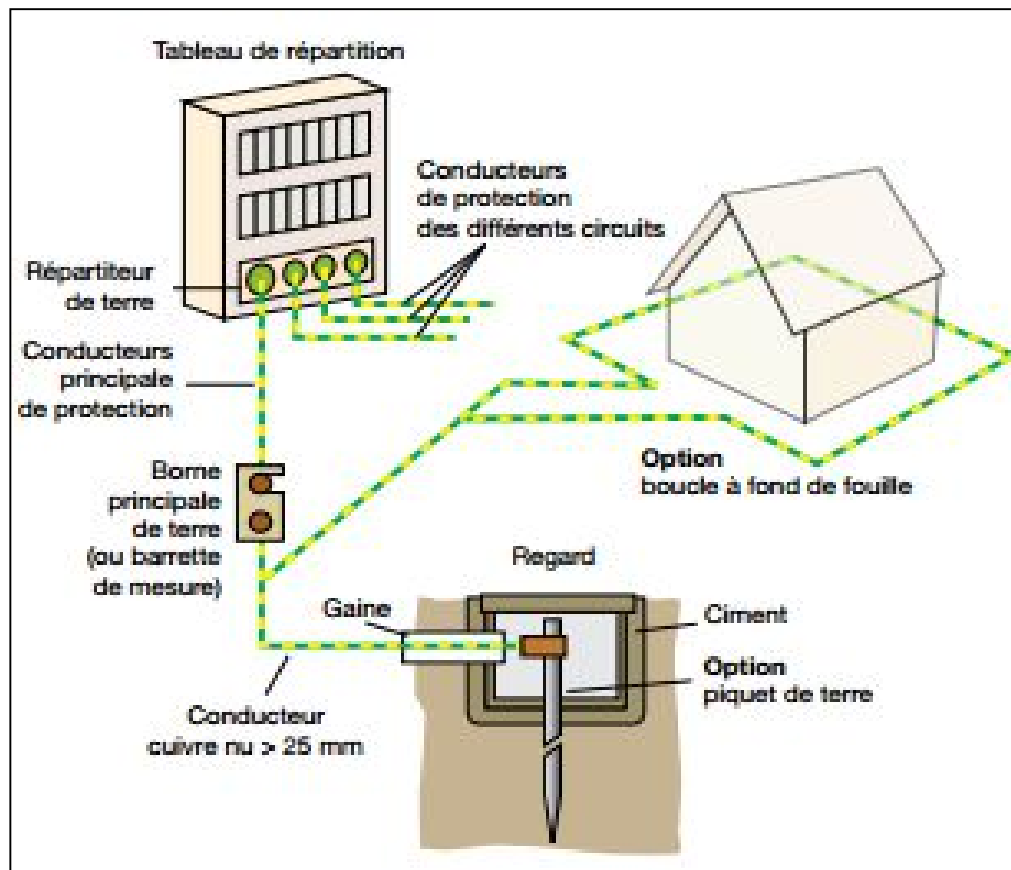


Figure 5: Mise en place de la prise de terre [1]

Quel que soit le type de prise de terre choisi, son rôle est d'être en contact étroit avec la terre dans le but de fournir une connexion avec le sol et de diffuser les courants de défauts. La réalisation d'une bonne prise de terre va donc dépendre de trois éléments essentiels :

- La nature de la prise de terre
- Le conducteur de terre
- La nature et la résistivité du terrain d'où l'importance de réaliser des mesures de résistivité avant l'implantation de nouvelles prises de terre

La résistivité ρ (l'inverse de la conductibilité), la conductibilité électrique est l'aptitude d'un matériau à faire circuler librement des charges électriques libres dont le courant électrique. Elle dépend de plusieurs facteurs : nombre d'électron de valence du matériau, la concentration du matériau, la température, etc... Dans les faits, plus il y a de charges libres dans le matériau pour transporter le courant, plus le matériau est conducteur.

Dans la mesure où la température et l'humidité sont plus stables en s'éloignant de la surface de la terre, plus le système de mise à la terre est profond et moins celui-ci est sensible aux changements d'environnement. Il est donc conseillé de réaliser la prise de terre la plus profondément possible. Variations saisonnières de la résistance de terre (Mise à la terre : électrode dans un sol argileux) l'étude a été faite par la société Chauvin-Arnoux

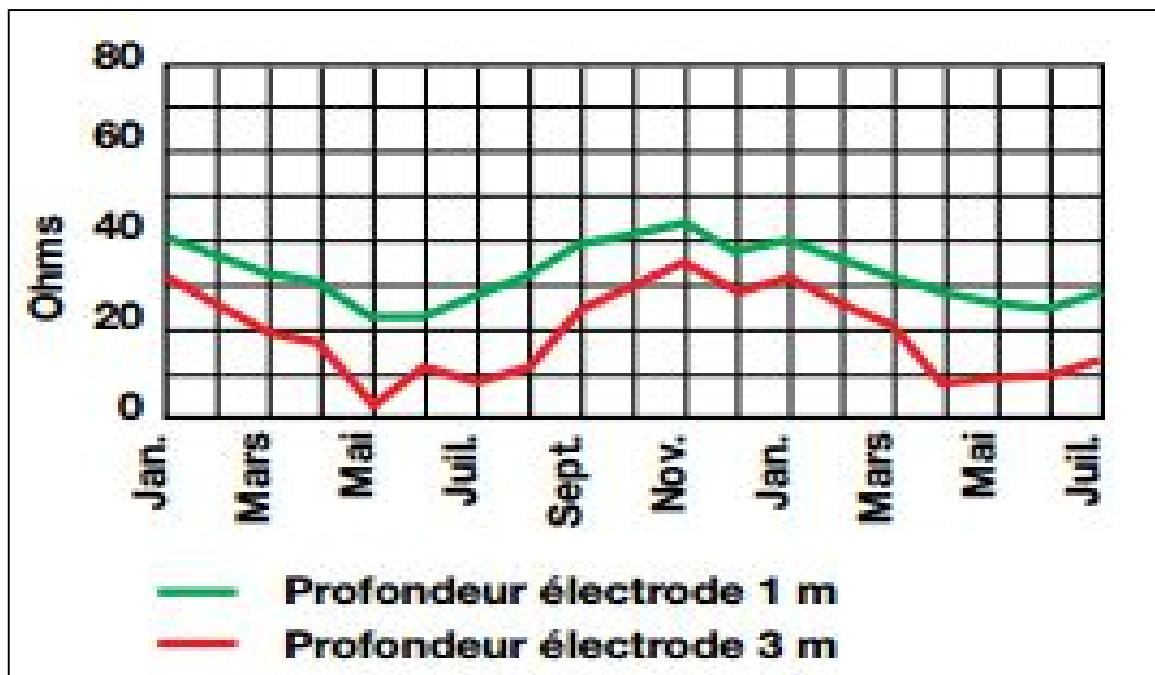


Figure 6: Résistance en fonction de profondeur [1]

Le tableau suivant nous donne des valeurs de résistivité de quelques types de et nature de terrains

Tableau 2 : Résistivité en fonction de la nature du terrain [1]

Nature du terrain	Résistivité (en Ωm)
Terrains marécageux	De qqes unités à 30
Limon	20 à 100
Humus	10 à 150
Marnes du jurassique	30 à 40
Sable argileux	50 à 500
Sable siliceux	200 à 3000
Sol pierreux nu	1500 à 3000
Sol pierreux recouvert de gazon	300 à 500
Calcaires tendres	100 à 300
Calcaires fissurés	500 à 1000
Micaschistes	800
Granit et grès en altération	1500 à 10000
Granit et grès très altérés	100 à 600

La mesure de résistivité va permettre :

- De choisir l'emplacement et la forme des prises de terre et des réseaux de terre avant leur construction,
- De prévoir les caractéristiques électriques des prises de terre et réseaux de terre,
- D'optimiser les coûts de construction des prises de terre et réseaux de terre (gain de temps pour obtenir la résistance de terre souhaitée).

Elle est donc utilisée sur un terrain en construction ou pour les bâtiments tertiaires de grande envergure (ou des postes de distribution d'énergie) où il est important de choisir avec exactitude le meilleur emplacement pour les prises de terre.

I.5. Méthodes de mesure de résistivité

I.5.a. Technique de mesure : [3]

Plusieurs procédés sont utilisés pour déterminer la résistivité des sols, en utilisant C_1 et C_2 comme électrodes pour l'injection du courant, et P_1 et P_2 comme électrode pour la mesure de la tension ; ces méthodes sont les suivantes :

- La méthode Schlumberger,
- La méthode de Dipôle-dipôle,
- La méthode de Pôle-dipôle,
- La méthode de Pôle-pôle,
- La méthode Tomographie,
- La méthode de Wenner (objet de notre étude),

Ces techniques sont schématisées dans les figures suivantes :

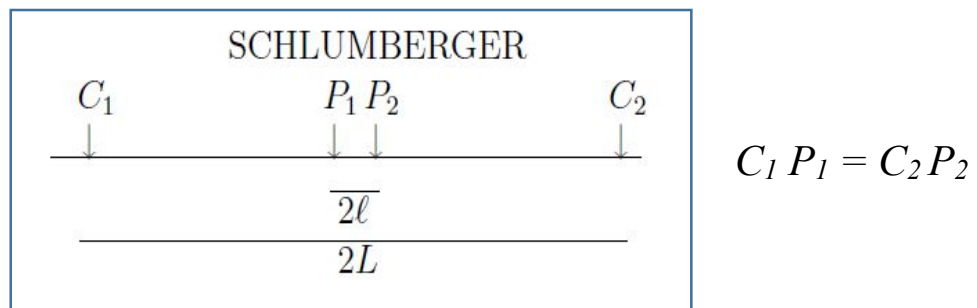


Figure 7: Technique Schlumberger

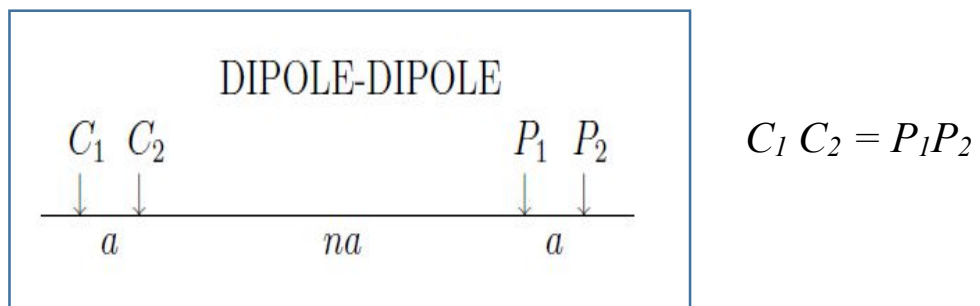


Figure 8: Technique Dipôle-dipôle

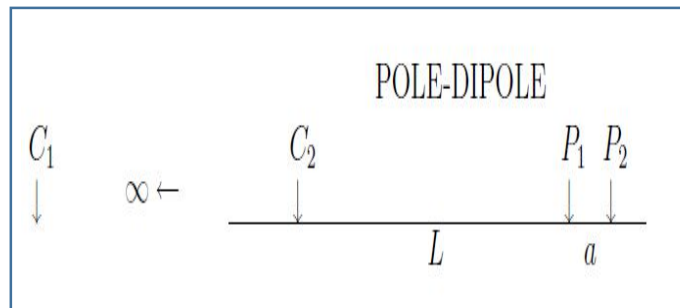


Figure 9: Technique Pôle-dipôle

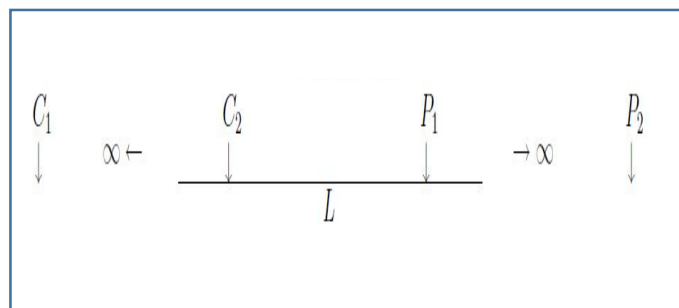


Figure 10: Technique Pôle-pôle

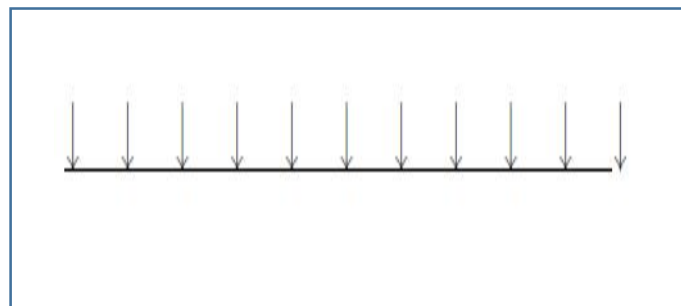


Figure 11: Technique Tomographie

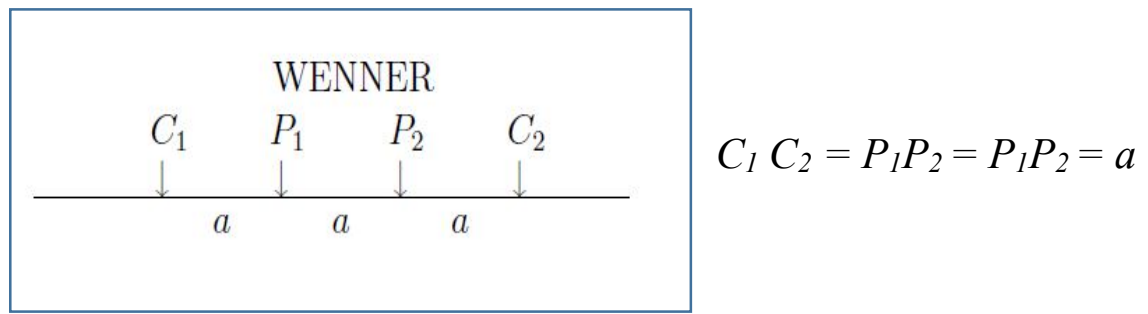


Figure 12: Technique WENNER

Dans notre étude, nous nous sommes restreint à la méthode de Wenner, vu que l'originalité du sondage électrique lui appartient, et qu'il en est le pionnier.

I.5.b. Méthode de Wenner :

Principe de mesure

Quatre électrodes sont disposées en ligne sur le sol, équidistantes d'une longueur **a**. Entre les deux électrodes extrêmes (*E* et *H*), on injecte un courant de mesure *I* grâce à un générateur. Entre les deux électrodes centrales (*S* et *ES*), on mesure le potentiel ΔV grâce à un voltmètre.

L'appareil de mesure utilisé est un ohmmètre de terre classique qui permet l'injection d'un courant et la mesure de ΔV . La valeur de la résistance *R* lue sur l'ohmmètre permet de calculer la résistivité par la formule de calcul simplifiée suivante :

$$\rho = 2 \pi a R \quad (4)$$

Avec

ρ : résistivité en $\Omega.m$ au point situé sous le point 0, à une profondeur de $h = 3a/4$

a : base de mesure en *m*

R : valeur (en Ω) de la résistance lue sur l'ohmmètre de terre

Nous préconisons une mesure avec $a = 4$ m minimum.

La figure suivante nous donne la disposition des différents éléments du montage de la méthode WENNER

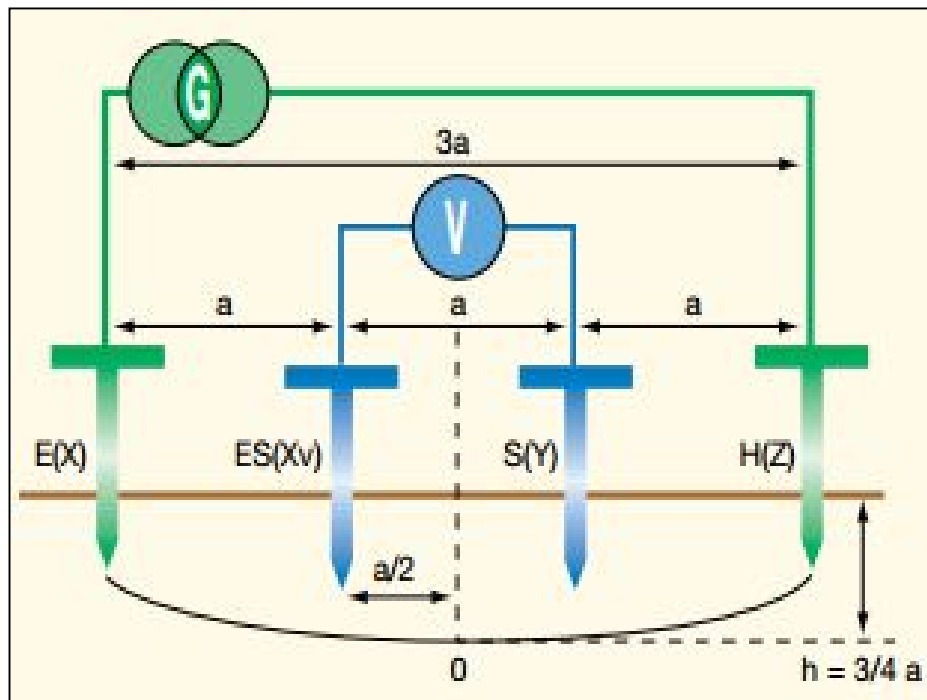


Figure 13 : Disposition des électrodes selon la méthode de Wenner [1]

Les termes X , X_v , Y et Z correspondent à des appellations alternatives utilisées respectivement pour les électrodes E , Es , S et H .

Sachant que :

$$\rho = 2 \pi a R \quad (5)$$

$$V = RI \quad (6)$$

$$V = \rho I / 2 \pi a \quad (7)$$

Application de la méthode

- Aide à la réalisation d'un ouvrage
- Contrôle couche de forme
- Suivi des évolutions dans le temps

- a. Dans le domaine des hydrocarbures, elle permet de connaître les différentes couches géologiques pour avoir une prévision sur les formations qu'il faut forer et par conséquent avoir une prévision au préalable sur le cout, le temps et le matériel à utiliser.

La figure 14 représente un schéma synoptique de la méthode utilisée qui permet de mesurer la résistivité des couches terrestres.

Son principe est de connaître la nature du sol en fonction de la valeur du graphe.

Ex : une résistivité de 400 $\Omega.m$ à une profondeur de 5 m montre qu'on est sur une couche de gravier

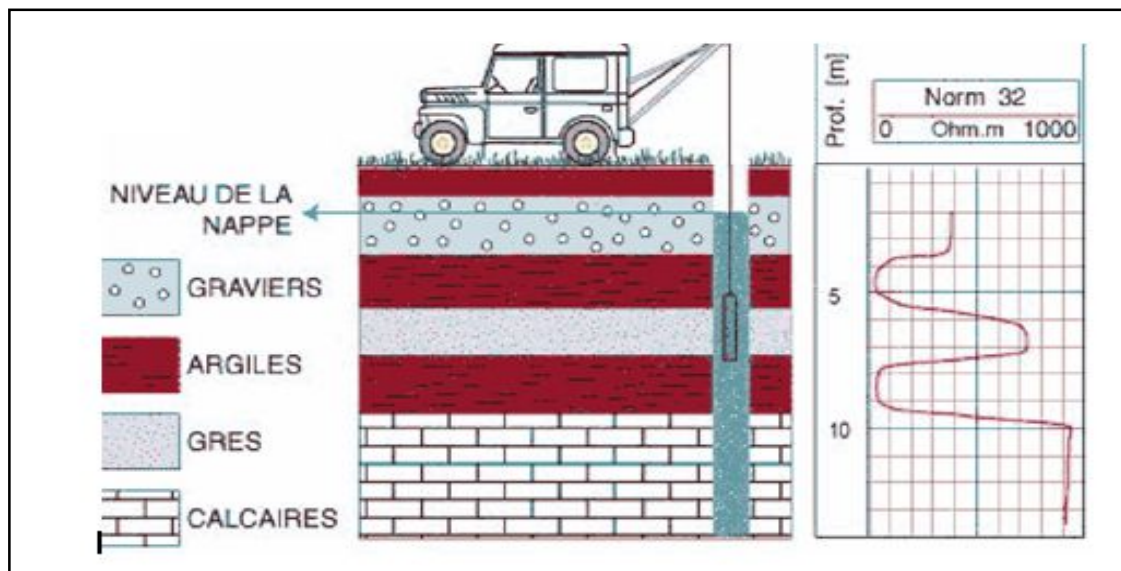


Figure 14: Mesure de la résistivité [4]

Dans le domaine du Génie civil - Géotechnique elle permet :

- L'Identification de zones de fracturation et/ou d'effondrement sous des ouvrages d'art,
- La localisation de zones d'affaissement sous la voirie publique,
- Le zonage de sols argileux pour l'étude des risques d'inondation,
- La recherche d'unités géologiques massives et profondes avant le percement de tunnels,
- L'étude de la stabilité de talus et des glissements de terrain.

- b.** Dans le domaine de l'Environnement elle permet la délimitation de décharges et recherche de contaminants,

L'étude réalisé par la méthode de Wenner sur un terrain servira à donner une valorisation ou non en vue de son exploitation ; ceci est exigé par des organisations mondiales.

L'accord de l'exploitation d'un terrain n'est possible que s'il est validé par cette organisation.

- c.** Dans le domaine de l'Hydrogéologie :

Recherche d'eau souterraine (thermale, minérale, potable et agricole...),

Une eau avec la même concentration en poids de sels dissous aura une résistivité différente selon les ions en présence.

- d.** Dans le domaine de l'Archéologie :

Recherche de vestiges archéologiques.

- e.** Dans le domaine des Mines et carrières :

Elle aide l'exploitant de carrières à développer et à étendre géographiquement les zones d'extraction (recherche de minerais, de graves, de sables ou de roches massives)

I.6. Résistivités de quelques milieux

Dans les tableaux suivant nous citons quelques exemples de résistivités de quelques milieux.

Tableau 3 : Résistivité de différentes eaux domestiques. [5]

Types d'eau	Concentration ppm	Résistivité ohms*m	Conductibilité microsiemens/cm
eau potable	500	12	833
eau médiocre	1000	6	1666
eau mauvaise	2000	2,8	3571
eau non potable	8000	0.75	13333
eau de mer	35000	0,2	50000
eau de Vichy	5167	1,2	8000
eau d'Henniez	500	12	833
eau du robinet	311	18	550

Tableau 4 : Résistivité de différentes eaux non domestiques [5]

Type d'eau ou de polluant	Résistivité (ohm*m)
Eaux des rivières du plateau Suisse	15 – 35
Rhône	80
Lac Léman	40 – 50
Lac de Neuchâtel	40 – 50
Eau de pluie	30 – plusieurs milliers
Fleuve Balé (Mali)	300
Fleuve Niger	100
Hydrocarbure	Résistivité infinie
P :C :E. (Perchloréthylène)	Résistivité infinie
Jus de décharge	5

Le tableau suivant représente différentes résistivités de quelques matériaux.

Tableau 5 : Résistivité de quelques matériaux [5]

Roches	Porosité totale (%)	Perméabilité (cm/s)	Résistivité (ohms*m)
Argilite	35	10^{-8} - 10^{-9}	70 à 200
Craie	35	10^{-5}	30 à 300
Tuf volcanique	32	10^{-5}	20 à 300
Marnes	27	10^{-7} - 10^{-9}	20 à 100
Grès	3 à 35	10^{-3} - 10^{-6}	30 à 800
Dolomite	1 à 12	10^{-5} - 10^{-7}	200 à 10'000
Calcaires	3	10^{-10} - 10^{-12}	200 à 10'000
Métaschistes	2.5	10^{-4} - 10^{-9}	300 à 800
Gneiss	1.5	10^{-8}	1'000 à 20'000
Quartzite	<1	10^{-10}	1'000 à 10'000
Granite	1	10^{-9} - 10^{-10}	1'000 à 15'000
Gabbro	1 à 3	10^{-4} - 10^{-9}	6'000 à 10'000
Basalte	1.5	10^{-6} - 10^{-8}	800 à 15'000

Chapitre 2

Formulation de la Méthode de WENNER

Chapitre II : Formulation de la méthode de WENNER

II.1. Principe du sondage électrique

Le sondage électrique est une méthode d'exploration du sous-sol qui repose sur la mesure de la résistivité électrique ρ (en $\Omega.m$). 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

Les Avantages de la méthode résident dans le cout, sureté, environnement ; rapidité, l'autonomie du circuit.

On injecte un courant d'intensité faible dans le sol au moyen de deux électrodes (A et B) et on mesure la différence de potentielle entre deux électrodes (M et N).

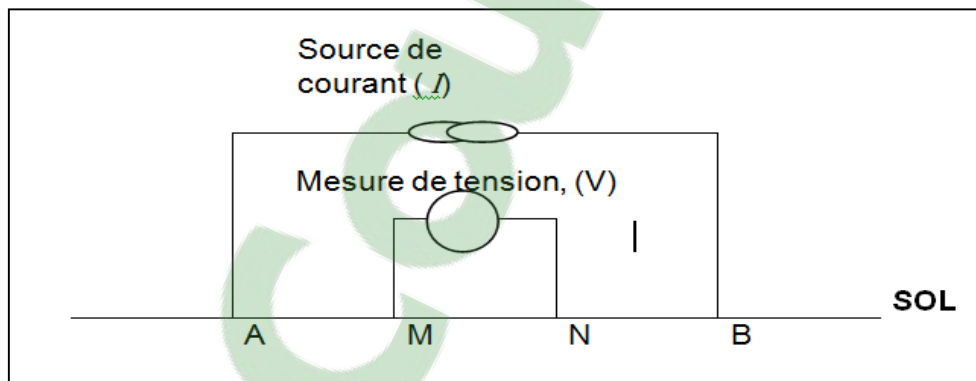


Figure 15: Source de courant et mesure de tension [6]

Le courant injecté dans le sol se propage de deux façons différentes :

- Par conduction électronique (conduction due à l'existence d'électron libre dans les matériaux concernés)
- Par conduction ionique (dit aussi électrolytique) la conduction est due à la présence du fluide dans les pores de la roche.

II.2. Principe de calcul :

Il existe 4 principes de calcul

- Loi de coulomb et potentiel
- Avec 1 électrode
- Avec 3 électrodes
- Avec 4 électrodes

La figure 15, représente un sondage électrique à quatre électrodes. La profondeur atteinte par les lignes du courant et directement fonction de l'espacement entre les électrodes d'injection et des résistivités réelles des terrains rencontrés.

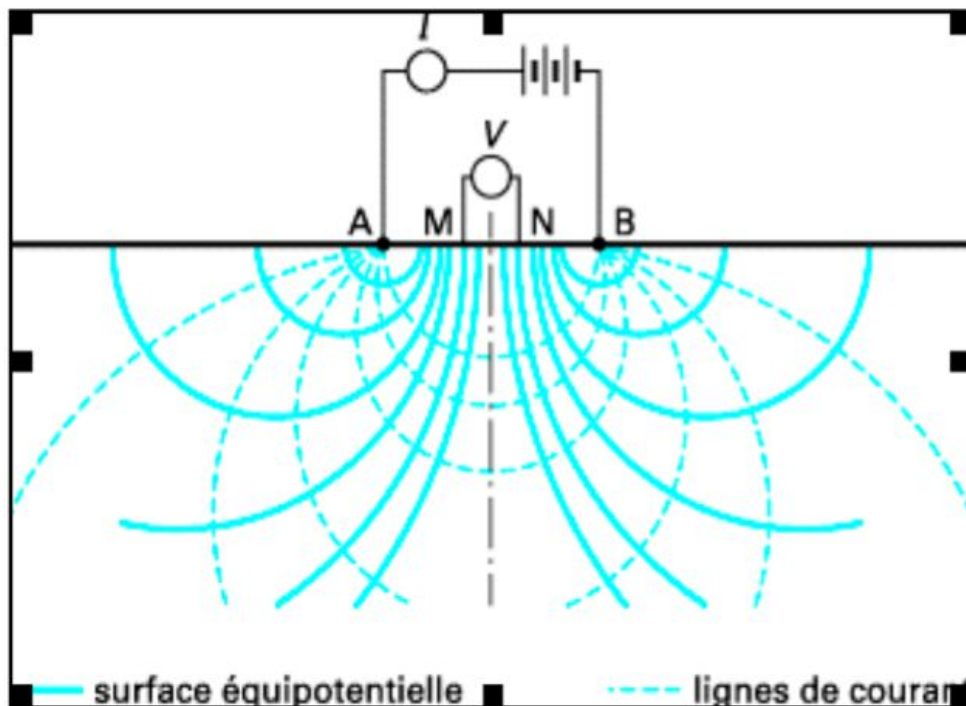


Figure 16: Propagation des ondes en profondeur [6]

On mesure la résistivité selon deux méthodes :

- En sondage :

On effectue l'étude de la variation de la résistivité en fonction de la profondeur par écartement progressif des électrodes d'injection.

- En traînée :

On utilise un dispositif de dimension constante qu'on déplace sur la surface prospectée. On établit de la sorte une carte de résistivité qui permet de mettre en évidence des anomalies bidimensionnelles.

II.3. Le sondage électrique.

Donc, plus l'écartement **AB** est grand, plus l'influence des terrains profonds ne se fait sentir. On considère généralement que la profondeur d'investigation H répond à la relation suivante :

$$H = AB/4 \quad (8)$$

En conséquence, si l'on désire connaître les variations de la résistivité en fonction de la profondeur, on effectue un sondage électrique, en adoptant des conditions suivantes

- Distance entre les électrodes M et $N \ll$ Distance entre les électrodes A et B
- Les électrodes MN sont fixes
- Les électrodes AB sont progressivement écartées
- A l'issue du sondage, pour chaque couple $(AB/2, MN/2)$, on dispose des valeurs de :
- L'intensité du courant injectée en A et B
- ΔV la différence du potentiel mesuré en M et N

Chapitre II : Formulation de la méthode de WENNER

On déduit les valeurs de la résistivité apparente ρ_a :

$$\rho_a = K \Delta V / I \quad (9)$$

Avec : $K \pi (AB^2 - MN^2) / 4MN$ (10)

On trace la courbe expérimentale $\rho_a = f(AB/2)$ (11)

La figure 17 et figure 18 représente une courbe expérimentale typique

$$\rho_a = F(AB/2) \quad (12)$$

Un modèle $\rho_1 < \rho_2$

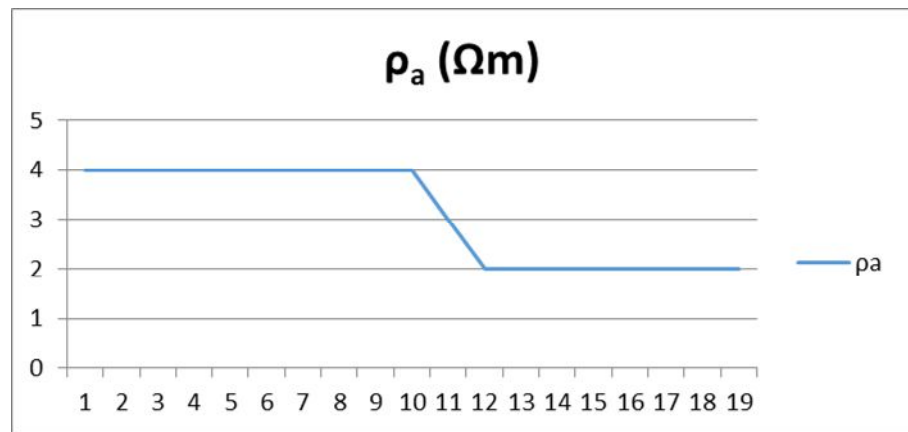


Figure 17: Résistive ($\rho_1 < \rho_2$) [6]

De la même façon si $\rho_1 > \rho_2$:

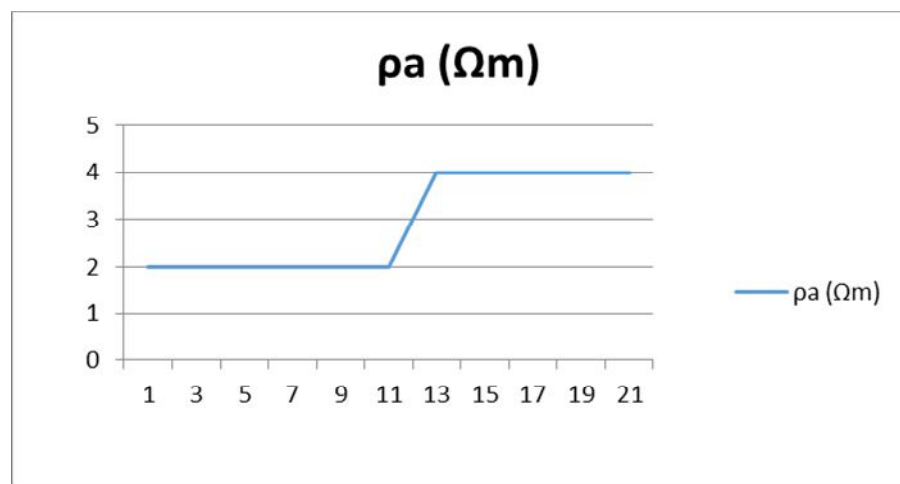


Figure 18: Résistive ($\rho_1 > \rho_2$) [6]

Chapitre II : Formulation de la méthode de WENNER

L'interprétation du sondage électrique ne permet pas de trouver directement la structure du sous-sol. En effet, l'interprétation des sondages se fait dans le cadre de modèle tubulaire de couche homogène et isotrope.

Donc il faut garder à l'esprit les principes suivants :

- Principe d'équivalences

Concerne des couches dont la résistivité est soit inférieure soit supérieure à celle des deux terrains entre lesquels elles sont comprises.

- Principe de suppression

Si ρ_2 est intermédiaire entre ρ_1 et ρ_3 et que l'épaisseur h_2 n'est pas très grande, l'effet de ce terrain sera négligeable. En particulier ce cas peut se rencontrer en hydrogéologie quand on cherche à mettre en évidence une nappe phréatique située au-dessus d'un terrain très conducteur.

II.4 Trainée Electrique

Montage WENNER :

Dans ce dispositif les électrodes sont alignées et espacées régulièrement avec :

$$AM = MN = NB = a$$

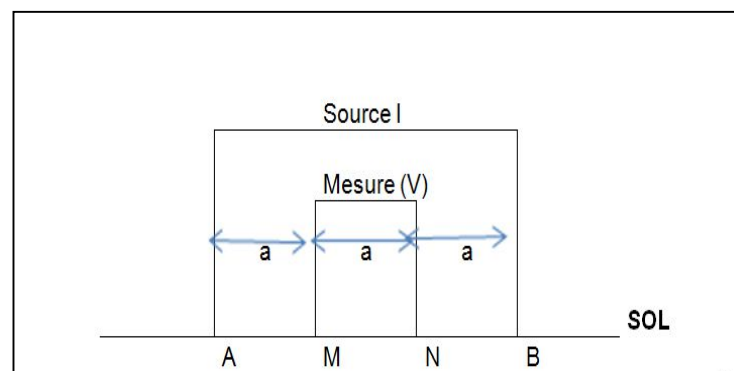


Figure 19: Montage de Wenner [6]

En conséquence la résistivité apparente est obtenue par l'équation suivante :

$$\rho_a = K \Delta V / I \quad (9)$$

Chapitre II : Formulation de la méthode de WENNER

Soit une couche homogène de longueur **l** et de résistance **R** traversée par un courant

I. La loi d'Ohm nous donne la différence de potentiel

$$\Delta V = RI \quad (13)$$

Sachant que la résistivité

$$\rho = RA/l \quad (14)$$

Alors

$$\Delta V/l = \rho I/A \quad (15)$$

En faisant tendre l vers zéro, nous pouvons réécrire l'équation précédente sous sa forme différentielle.

$$-\nabla V = \rho \text{ vect}(j) \quad (16)$$

Où $\text{vect}(j)$ est la densité de courant électrique. Le signe moins vient du fait que le potentiel **V** est plus élevé au début du circuit qu'à la fin (sinon le courant $\text{vect}(j)$ circulerait dans l'autre sens.), alors que ∇V est la différence entre le potentiel de la fin moins celui du début du circuit. . Considérons maintenant le cas du potentiel électrique dans un demi-espace homogène causé par une source de courant ponctuelle d'intensité **I**.

Le courant circule radialement et sera distribué uniformément autour d'une coque hémisphérique

A un point **P** situé à une distance **r** de la source, la coque a une surface de $2\pi r^2$, donc la densité de courant est donnée simplement par :

$$j = I/2\pi r^2 \quad (17)$$

On conclut alors que le gradient du potentiel est donné par

$$-\nabla V = (dy/dr) = \rho j = \rho I/2\pi r^2 \quad (18)$$

et le potentiel à une distance **r**, $V(r)$, s'obtient par simple intégration

$$V(r) = \rho I/2\pi r^2 + Cte \quad (19)$$

Chapitre II : Formulation de la méthode de WENNER

La constante est égale à zéro car le potentiel est forcément nul à une distance infini de la source,

D'où :

$$V(r) = \rho I / 2\pi r^2 \quad (20)$$

Considérons que nous avons deux électrodes d'injection en **A** et en **B**. Alors, en tout point **P** on aura

$$V(P) = \rho I / 2\pi (1/R_{AP} - 1/R_{BP}) \quad (21)$$

Ou **R_{AP}** et **R_{BP}** sont les distances entre les électrodes d'injection et le point de mesure. On peut alors calculer les équipotentielles, i.e. les points pour lesquels

$$(1/R_{AP} - 1/R_{BP}) = Cte \quad (22)$$

Sachant que $\text{vect } j = -\sigma \nabla V$ (24)

Si les 'électrodes **A** et **B** sont en (**x_A,0**) et (**x_B,0**) respectivement, alors

$$\text{Vect } j(x,z) = (-1/2\pi) \nabla (1/\text{rac}[(x-x_a)^2 + z^2] - 1/\text{rac}[(x-x_b)^2 + z^2]) \quad (25)$$

Les composantes de *Vect j* pour *x* et *z*.

$$j_x = -\frac{I}{2\pi} \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{1}{\sqrt{(x-x_a)^2 + z^2}} - \frac{1}{\sqrt{(x-x_b)^2 + z^2}} \right) = -\frac{I}{2\pi} \left(\frac{x-x_a}{((x-x_a)^2 + z^2)^{3/2}} - \frac{x-x_b}{((x-x_b)^2 + z^2)^{3/2}} \right) \quad (26)$$

$$j_z = -\frac{I}{2\pi} \frac{\partial}{\partial z} \left(\frac{1}{\sqrt{(x-x_a)^2 + z^2}} - \frac{1}{\sqrt{(x-x_b)^2 + z^2}} \right) = -\frac{Iz}{2\pi} \left(\frac{1}{((x-x_a)^2 + z^2)^{3/2}} - \frac{1}{((x-x_b)^2 + z^2)^{3/2}} \right) \quad (27)$$

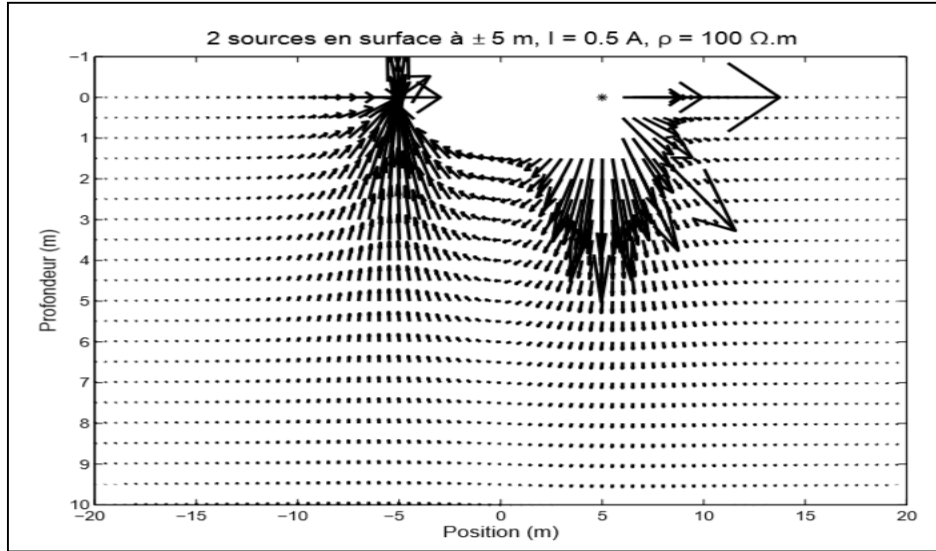


Figure 20: Direction du courant [6]

La figure 20 montre les directions du courant entre deux électrodes d'injection à ± 5 m. Les courants sont horizontaux à mi-chemin entre les électrodes et à la surface de la terre.

II.5 Dispositifs d'électrodes.

Après le positionnement des jalons, on peut aborder l'étude des divers dispositifs d'acquisition de mesures de résistivité électrique. Nous allons considérer que le sous-sol est un demi-espace homogène de résistivité ρ . Dans le cas général à 4 électrodes, on déploie deux électrodes d'injection

($A +I$ et $B -I$) et deux électrodes de mesure ($P1$ et $P2$).

Notons $\Delta V^{A_{P1} P2}$ la différence de potentiel (ddp) entre les électrodes $P1$ et $P2$ causée par l'injection en A et $\Delta V^{B_{P1} P2}$ celle causée par l'injection en B

On obtient

$$\Delta V^{A_{P1} P2} = \rho I / 2\pi (1/A_{p1} - 1/A_{p2}) \quad (28)$$

$$\Delta V^{B_{P1} P2} = -\rho I / 2\pi (1/B_{p1} - 1/B_{p2}) \quad (29)$$

En additionnant les deux termes, on obtient la différence de potentiel entrée, Soit

$$\Delta V_{P1 P2} = \rho I / 2\pi (1/A_{p1} - 1/AP2 - 1/B_{p1} - 1/B_{p2}) \quad (30)$$

Chapitre II : Formulation de la méthode de WENNER

Dans le dispositif Wenner, voir figure 12, L'écart inter-électrode (a) est constant. On déplace alors tout le dispositif d'un point de mesure à l'autre. Les ddp causées par le courant injecté en A et B sont respectivement

$$\Delta V_{P1 P2}^A = \rho I / 2\pi (1/a - 1/2a) \quad (31)$$

$$\Delta V_{P1 P2}^B = -\rho I / 2\pi (1/2a - 1/a) \quad (32)$$

Donc la ddp totale est :

$$\Delta V_{P1 P2} = \rho I / 2\pi (1/a - 1/2a - 1/2a + 1/a) \quad (33)$$

$$\Delta V_{P1 P2} = \rho I / 2\pi (2/a - 2/2a) \quad (34)$$

$$\Delta V_{P1 P2} = \rho I / 2\pi (1/a) \quad (35)$$

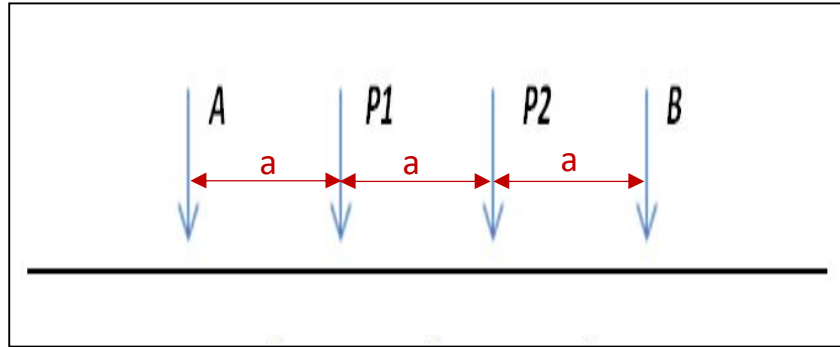


Figure 21: Positionnement des électrodes

Qui nous permet de déterminer la résistivité ρ :

$$\rho_w = (\Delta V_{P1 P2} / I) 2\pi a \quad (36)$$

Le dispositif Wenner est beaucoup utilisé en cartographie électrique. On peut couvrir une surface relativement grande.

ρ_w représente une résistivité apparente de Wenner, c'est-à-dire d'une résistivité intégrée de la surface jusqu'à une certaine profondeur la plupart du temps inconnue. On sait cependant que plus a est grand, plus cette profondeur sera grande. Il conviendra donc d'adapter le dispositif de mesure à la profondeur présumée de la cible. Par exemple, si l'on s'intéresse à un objectif à 10 m de profondeur, prévoir une distance a comprise entre 15 et 20 m.

Chapitre 3

Conception Résultats & Tests

Chapitre III : CONCEPTION RESULTATS ET TESTS

III.1. Schéma bloc :

Dans ce chapitre nous développons l'aspect théorique et pratique de notre dispositif. Le principe de la méthode est donné par deux blocs, représentés par la figure 22 :

- La source de courant
- La mesure de tension et amplification

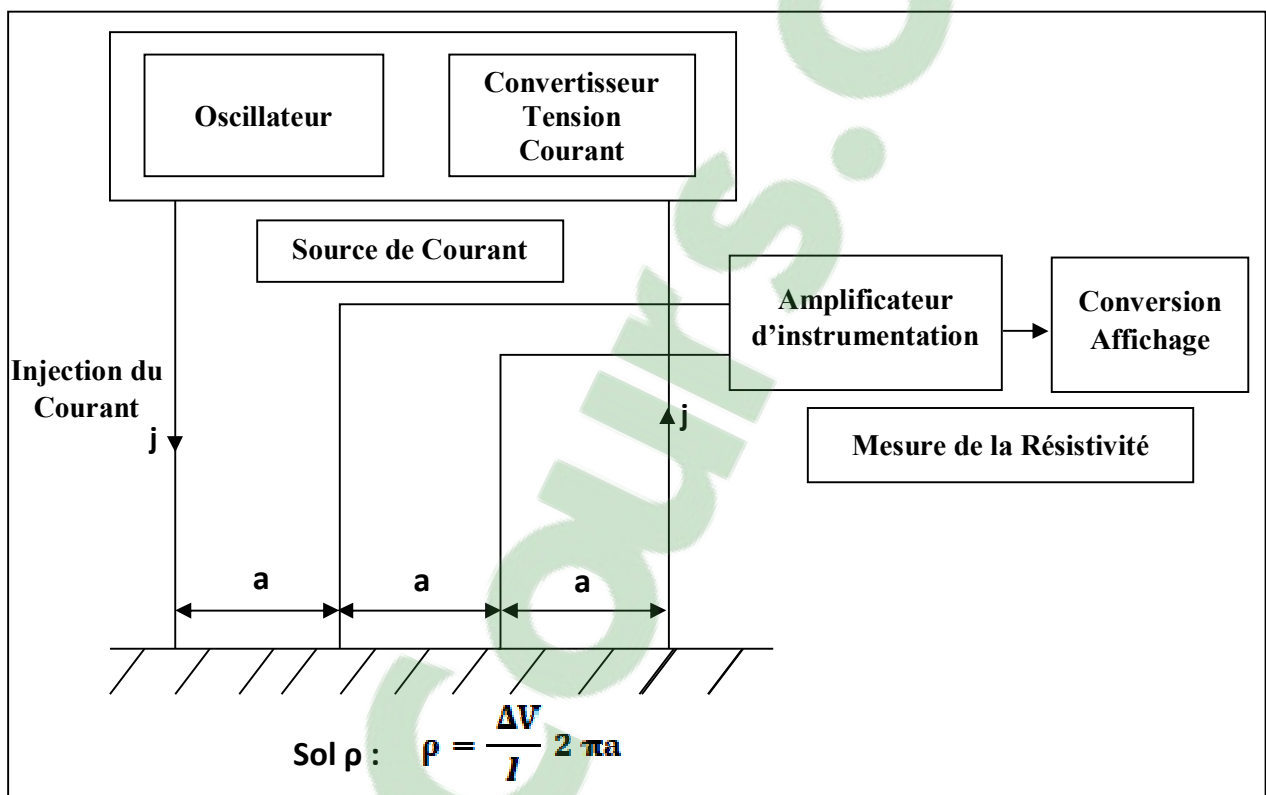


Figure 22: Synoptique du dispositif

III.2. Source de courant

Pour générer un courant on a utilisé deux circuits :

1- un oscillateur : à base de CI de type XR 2206 de la famille EXAR qui peut délivrer une tension sinusoïdale à une fréquence égale à 128 HZ (différente de multiple de secteur 50 HZ).

Chapitre III : CONCEPTION RESULTATS ET TESTS

Le circuit est alimenté sous une tension comprise entre -6 V et +6 V, et demande un courant de 0.1 mA selon la fréquence du signal de sortie. Il est donc tout à fait possible de le faire fonctionner sur piles ou accumulateurs.

2- un convertisseur tension/Courant on a choisi un CI TL081, ce circuit reçoit un signal d'entrée à partir du XR 2206 qui va être converti en courant.

La figure (23) représente l'oscillateur XR 2206 et le convertisseur tension courant :

Le schéma suivant nécessite une alimentation symétrique de (-6 V à +6 V)

Fonctionnement :

Pour avoir La fréquence $f_o = 128$ HZ d'oscillateur ; tell que

$$f_o = 1/RCI \quad (37)$$

On a choisi

$$C_I = 0.1 \mu F$$

On déduit alors

$$R = 78 k\Omega$$

La fréquence f_o est appelé fréquence d'oscillation du signal de sortie figure (23) (signal sinusoïdale) dépend de la valeur du condensateur " C_I " relie entre les bornes 5 et 6 du circuit XR 2206, et de la valeur de la résistance entre la borne 7 selon la formule précédente $f_o = 1/RCI$

f_o en Hertz, R en ohms et C en Farads.

Après génération du signal sinusoïdale à partir du pin "2" du XR 2206 en fait une conversion tension courant en utilisant un TL 081,

Oscillateur et convertisseur

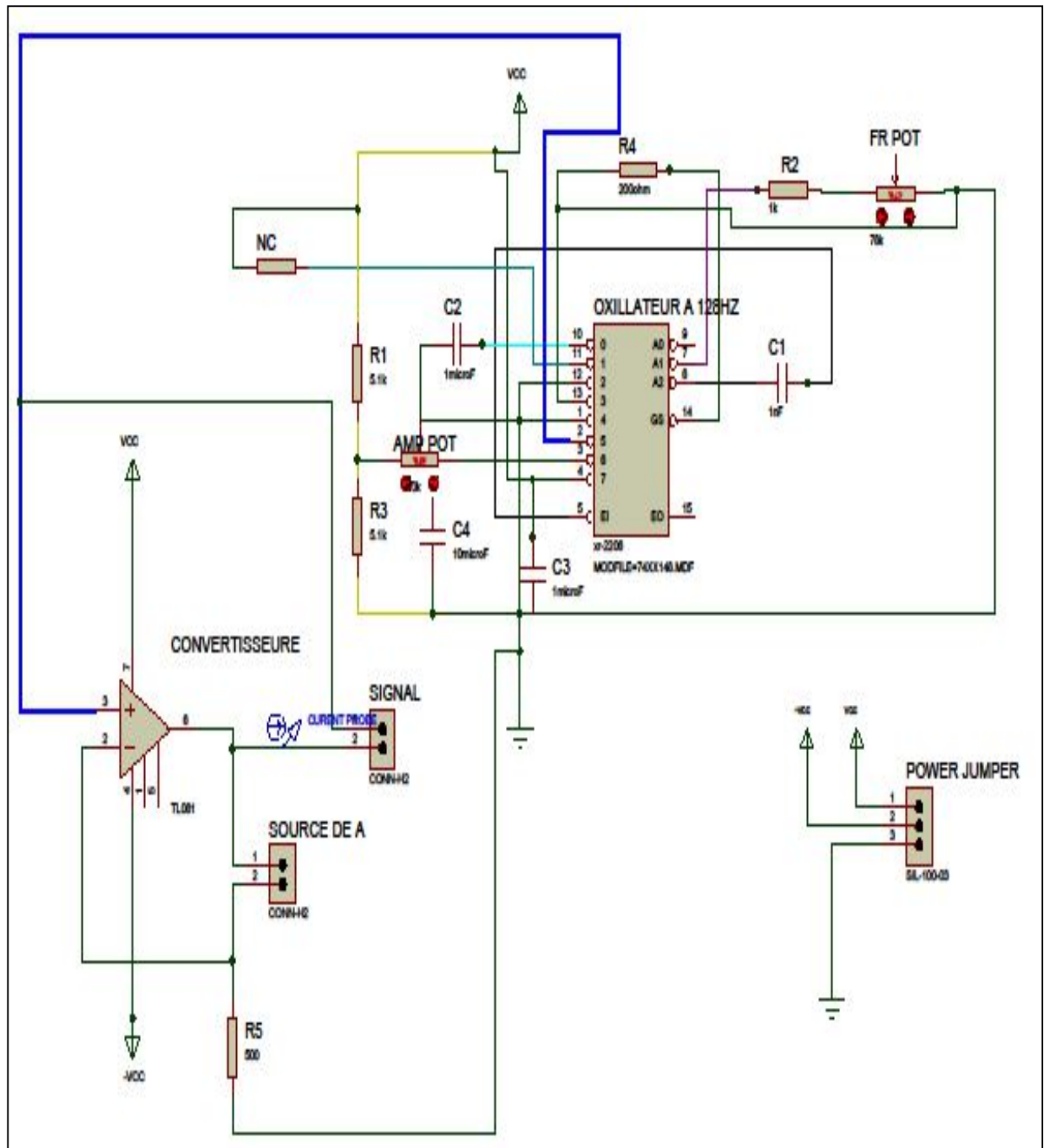


Figure 23: Circuit de la source de courant

Tableau 6 : Composants électriques et leurs valeurs

Quantités		Références	Valeurs
	Résistances (05)		
	2	R1, R3	5.1k
	1	R2	1k
	1	R4	200 ohm
	1	R5	500
	capacités (04)		
	1	C1	1nF
	2	C2, C3	1microF
	1	C4	10microF
	Divers (08)		
	1	AMP POT	10k
	1	CONVERTISSEURE	TL081
	1	FR POT	78k
	1	NC	
	1	OXILLATEUR A 128HZ	xr-2206
	1	POWER JUMPER	SIL-100-03
	2	SIGNAL, SOURCE DE A	CONN-H2

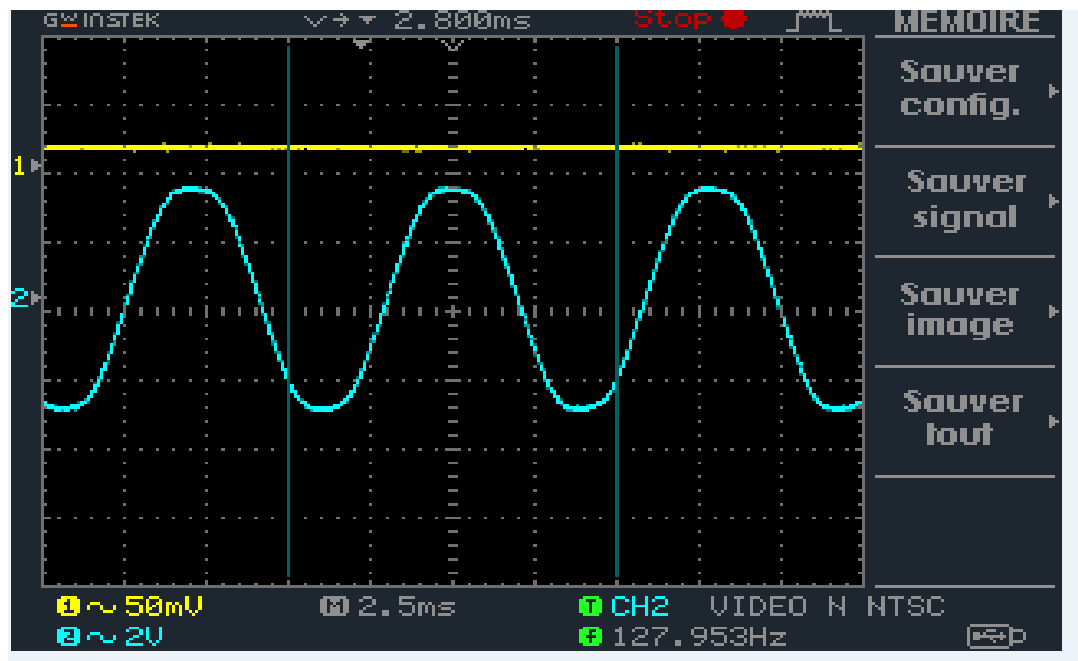


Figure 24: Au borne du pin 2 du XR 2206

Après avoir effectué le montage, à l'aide d'un oscilloscope au borne du pin 2, la visualisation nous révéla un signal sinusoïdale d'amplitude approximative de 2 Volt et d'une fréquence variant autour de 128 Hz qui concorde avec la valeur recherchée.

La figure 25 représente le circuit du XR 2206 et TL 081 en 3 D réalisé dans le cadre de notre projet.

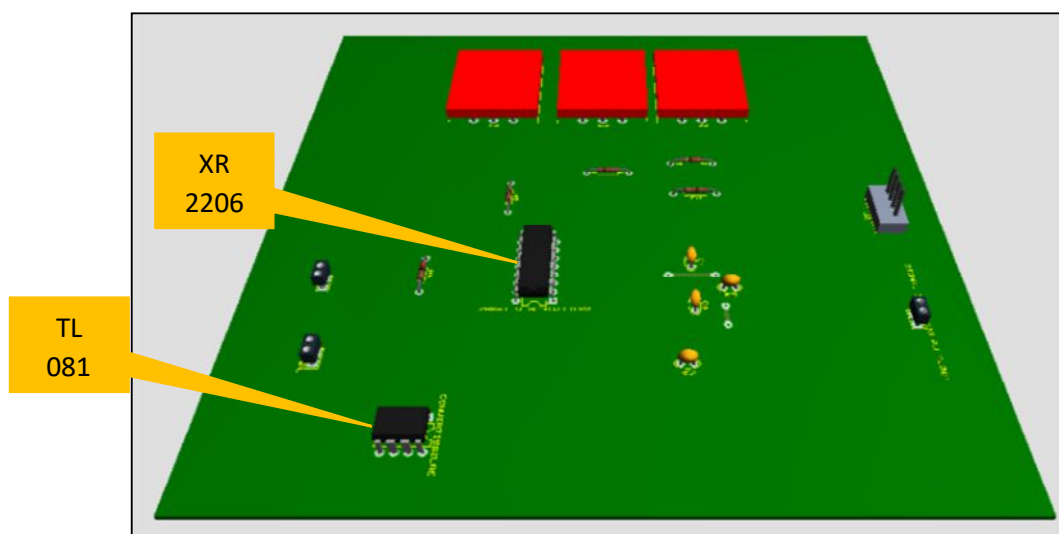


Figure 25: XR 2206 et TL 081

En utilise un convertisseur tension / courant pour avoir le courant I qui vas être injecté dans le sol

Comme :

$$e^+ = e^- = (R_5 + R_{sol}) \times I \quad (38)$$

Et sachant que :

$$e^+, \text{ est la sortie du signal sinusoïdale } e^+ = 1.8V = R_5 \times I \quad (39)$$

$$D'où I = 1.8V/R_5 = 1.8/500 = 0.0036Amp \quad (40)$$

$I = 3.6mA$ (source de courant I au borne de A et B , étude faite dans la partie théorique).

III.3. La mesure de tension

La valeur du courant de l'injection est très faible de quelques milliampère ($I = 3.6mA$), automatiquement la valeur du la tension de mesure doit très faible d'où la nécessiter d'une amplification a trois étages a base de TL 082 monté. On a une amplification d'instrumentation

$$V_S = (1 + 2R/R_0) (V_1 - V_2) \quad (41)$$

$$\rho = 2 \pi a R \quad (5)$$

On choisit $R = 22 k\Omega$,

R_0 un potentiomètre de 500 K. Ω m.

$$D'où : \quad V_S = 10(V_1 - V_2) \quad (42)$$

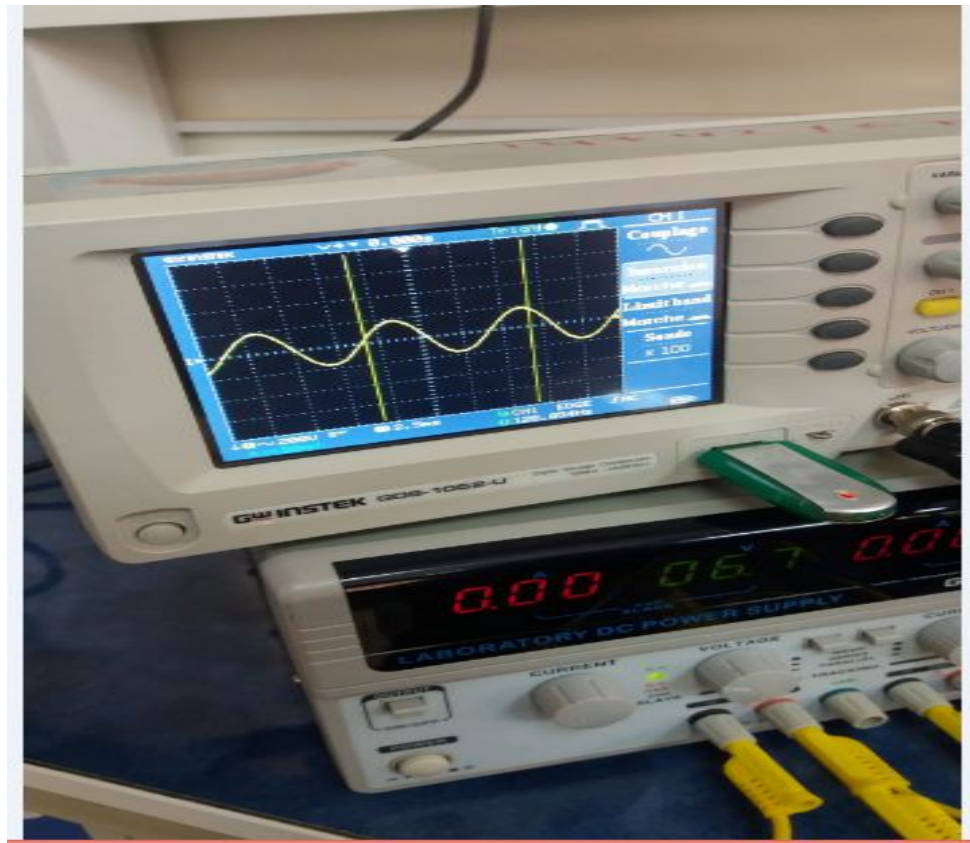


Figure 26 : Photo du signal de sorti du XR 2206

Signal sinusoïdal de fréquence 128 et signal de sortie du TL 081

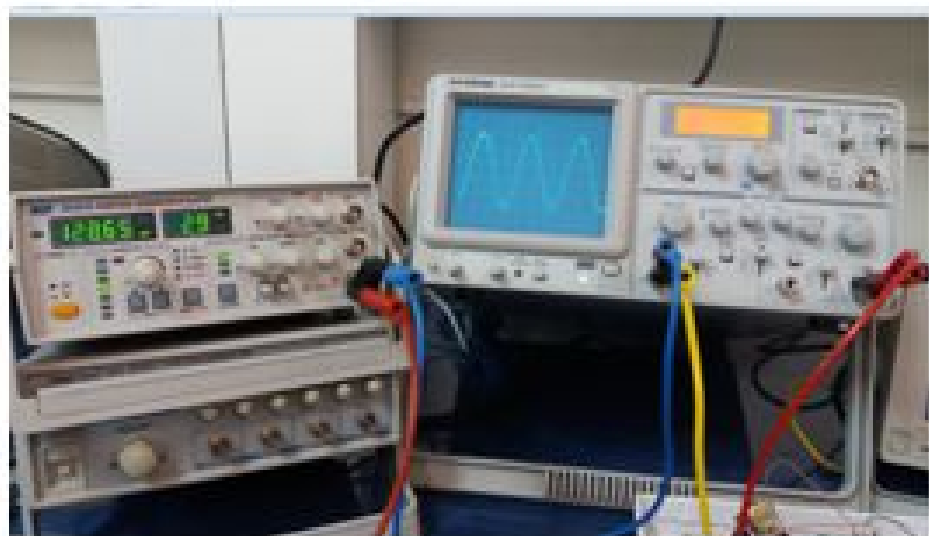


Figure 27 : Photo du signal du TL 081

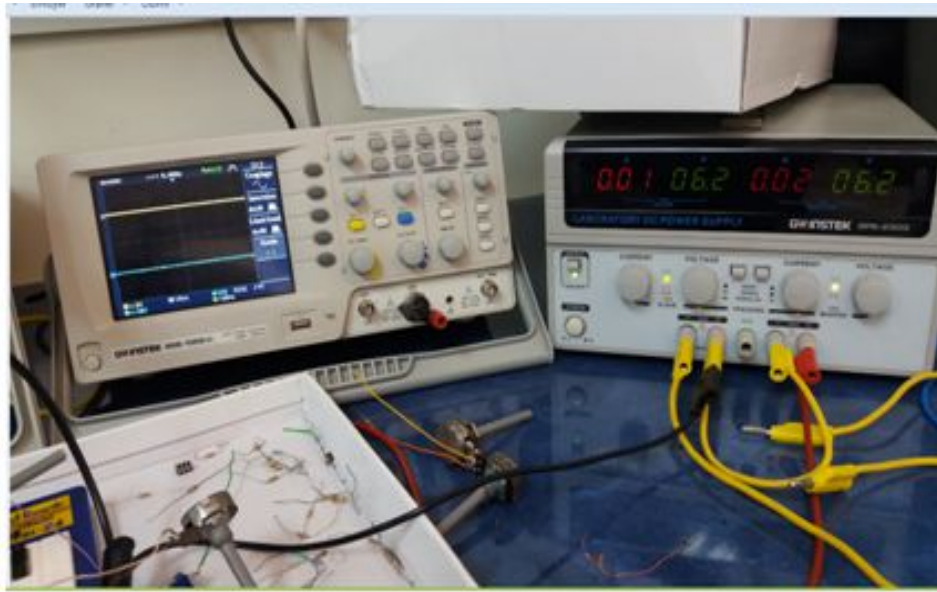


Figure 26 : Photo de tension d'alimentation

Avantage du circuit choisi

- l'autonomie du circuit c.à.d. on peut faire marcher le circuit en utilisant une batterie de 12 V ...
- Cout de montage très abordable
- Poids du montage ne dépassant pas quelque centaine de grammes.

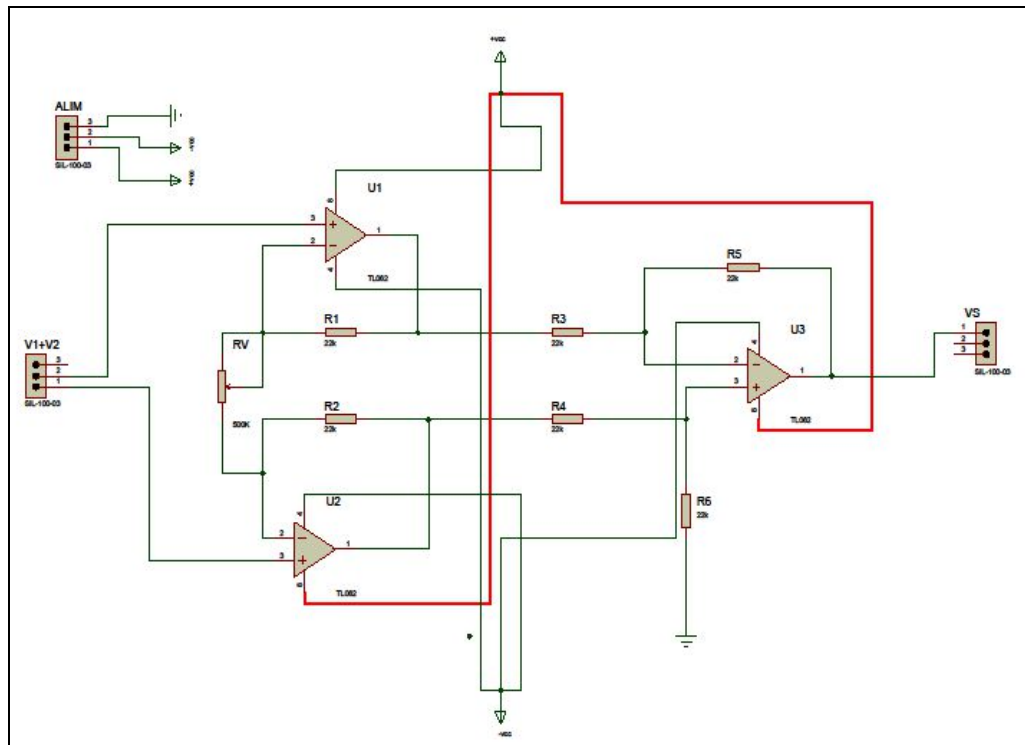


Figure 279 : Amplificateur de tension

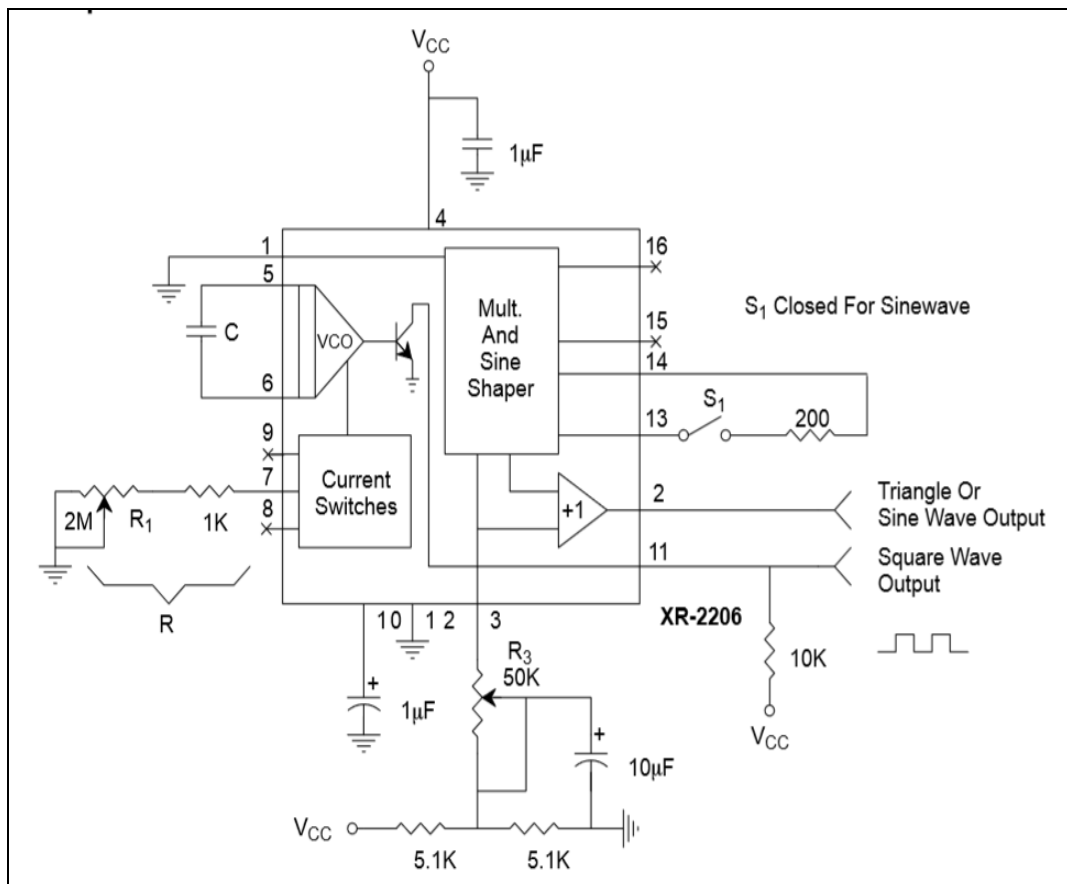


Figure 30 : Fiche technique du XR 2206 [7]

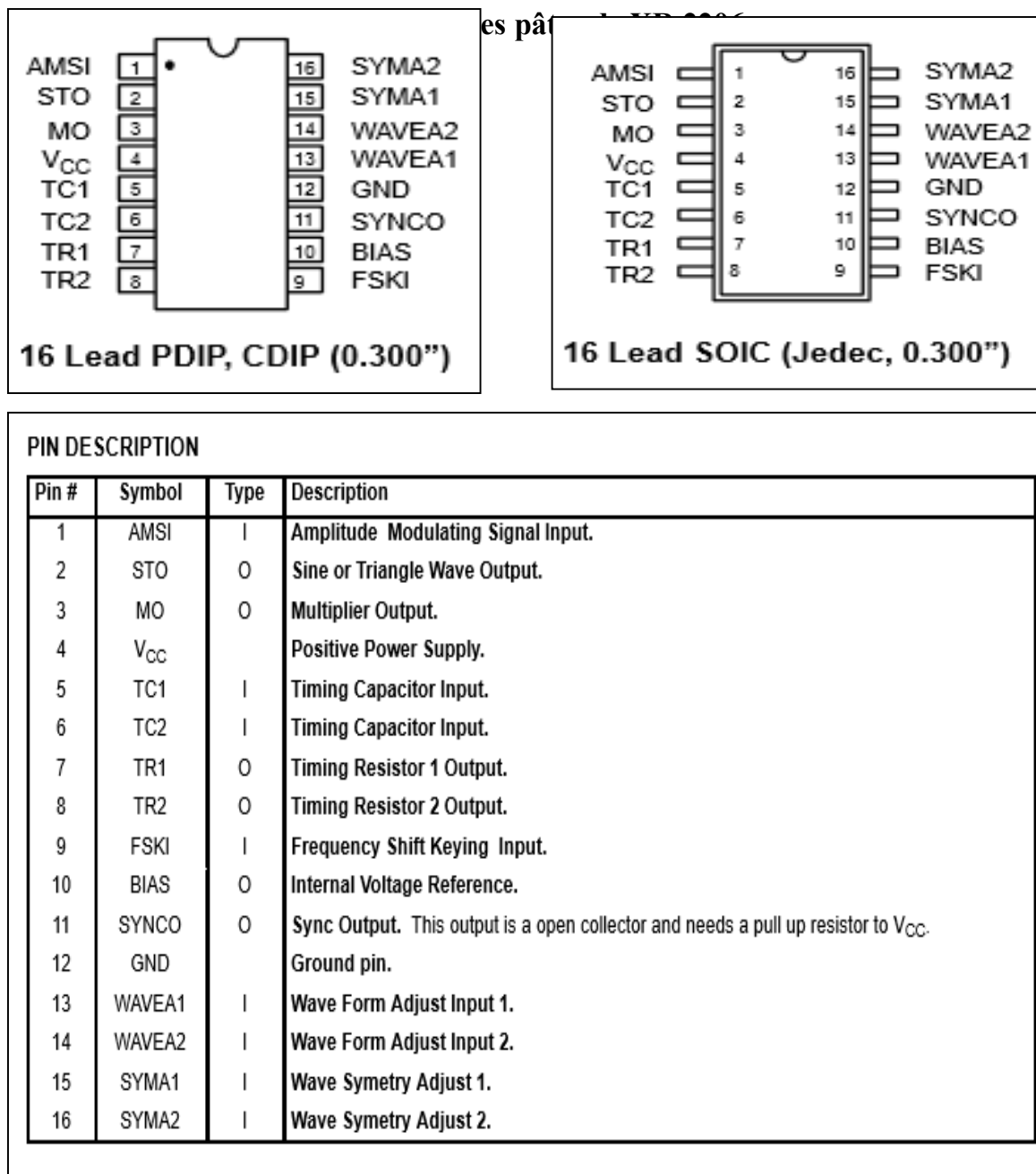


Figure 31 : Identification du Pin de XR 2206 [7]

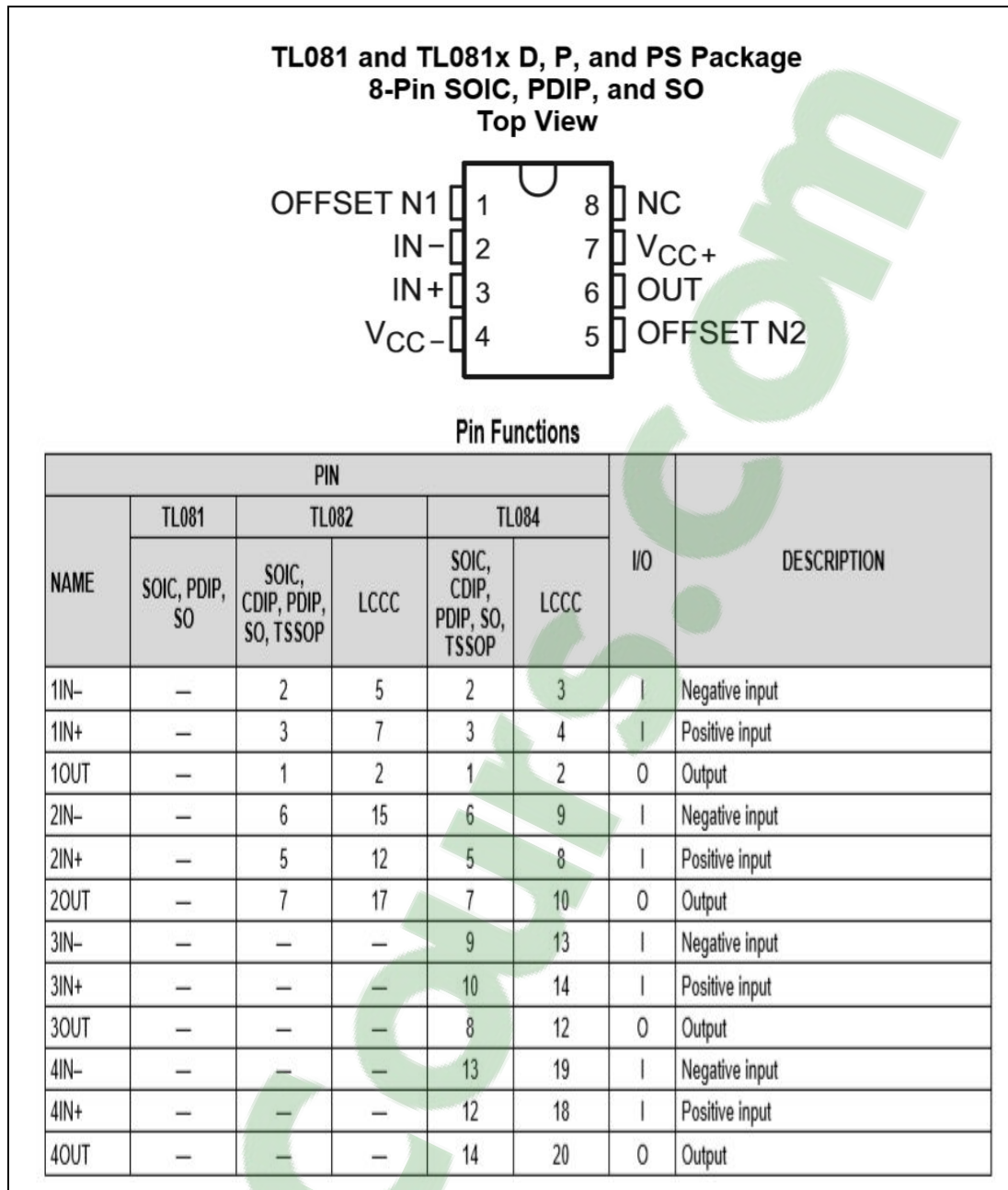


Figure 32 28: Fiche Technique et Identification du
Pin de TL 081 /TL 082 [8]

Conclusion

Générale

Conclusion générale

Le sondage électrique est moins onéreux qu'un sondage classique qui nécessite du matériel très lourd et très chers, en plus l'inaccessibilité dans certains terrains nous ont mené à faire l'étude d'une méthode qui non seulement utilise du matériel portatif, qui nous permet d'économiser un gain de temps considérable et de réaliser une réduction très importante du coût.

Cette méthode est de plus en plus demandée dans le secteur du génie civil, dans les divers forages et les sites à gros risques. Elle est largement utilisée en hydrologie pour la prospection des eaux souterraines. Elle est aussi utilisée en électrotechnique pour l'évaluation de la qualité des prises de terre dans les installations électriques.

Le projet que nous avons mené nous a permis de bien comprendre le sondage électrique en utilisant la méthode de WENNER. En se basant sur cette méthode, nous avons réalisé notre dispositif sur la base de deux blocs permettant la détermination de la résistivité des différents sols. Ce dispositif est très efficace pour le choix de la mise à la terre dans des différents sites même inaccessibles.

Les avantages du montage élaboré sont :

C'est un circuit autonome, cette autonomie peut être obtenue en utilisant une batterie 12 V.

Il aide les utilisateurs à connaître les résistivités des différents milieux terrestres.

Le cout de montage est relativement bas.

Le poids est léger par rapport à d'autres techniques de prospection.

Références Bibliographiques

Références Bibliographies

- [1] : Guide de la mesure de terre – Contrôleurs de terre et / ou résistivité –Chauvin Arnoux –Edition 4 2013
- [2] : www.Sheineder.com
- [3] : Prospection électrique, Guy Marquis EOST Strasbourg -19 Avril 2005
- [4] : Géophysique de Gisement et de Génie Civil, J.L. Mari et D. Chapellier. Edition TECHNIP E.A.G.E
- [5] : Prospection électrique de surface, D. Chapellier, cours en line de Géophysique Université de Lausanne .Institut Français de Pétrole
- [6] : Prospection électrique, DEUST Géosciences, module de géophysique, G. Callot université de la nouvelle Calédonie
- [7] : Fiche Technique <http://www.exar.com>
- [8] : Fiche Technique <http://www.ti.com>

Webographie

http://www.apageo.com/upload/gammes/documents/materiel-de-forage-carottage-et-tubage_639.pdf

<http://infoterre.brgm.fr/rapports/RR-39119-FR.pdf>

http://www.chauvin-arnoux.com/sites/default/files/D00VDU62_0.PDF

<http://forumbachelor.free.fr/gma/GMA1/index.php?page=46>

http://www.graie.org/osr/IMG/pdf/rapport_geopcarot_rcc1_tw_drm.pdf

<http://www.groupe.polymtl.ca/geo/marcotte/glq3401min/chapitre3.pdf>

http://www.voiedavenir.fr/content/cms_medias/LES%20ETUDES/LES%20ETUDES%20GEOTECHNIQUES/coupes%20et%20photos%20sondages%20-%20partie%201.pdf

http://www.svt.ac-versailles.fr/IMG/pdf/Comment_prelever_une_carotte_de_sediments.pdf

http://www.graie.org/osr/IMG/pdf/rapport_geopcarot_rcc1_tw_drm.pdf

<http://www.exar.com>

<http://www.ti.com>

RESUME

Le sondage électrique est un procédé très répandu dans plusieurs domaines afin de connaître les différentes roches dans une région du sous-sol, surtout dans les explorations des hydrocarbures et des eaux. Dans ces dernières décennies, une mobilisation importante de méthodes et de moyens de prospection de plus en plus performants se sont développées.

La prospection sismique regroupe deux méthodes ; la sismique réflexion qui utilise la réflexion des ondes sur les interfaces entre plusieurs niveaux géologiques, et la sismique réfraction qui utilise la propagation des ondes le long des interfaces entre les niveaux géologiques.

Dans notre travail nous avons étudié une autre technique de prospection qui est le sondage électrique. C'est une méthode d'investigation verticale ayant pour but d'évaluer l'aptitude des matériaux à laisser passer le courant électrique continu ou de faible fréquence. Elle repose, donc sur la mesure de la résistivité électrique ρ (en $\Omega.m$). 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.

Mots Clés : Courant, tension résistivité, mise à la terre, sondage électrique

ملخص

المسح الكهربائي هو عملية شائعة جدا في العديد من المجالات من أجل معرفة الصخور المختلفة في مساحة الطابق السفلي، وخاصة في مجال استكشاف النفط والمياه. في العقود الأخيرة، أساليب تعبئة كبيرة والتنقيب وسائل تطويرها قوية على نحو متزايد.

ويشمل الاختبار الزلزالي طريقتين. الانعكاس السيزمي الذي يستخدم انعكاس الأمواج على واجهات بين عدة مستويات الجيولوجية، واستخدام الموجات الزلزالية الانكسار على واجهات بين مستويات الجيولوجية.

في عملنا قمنا بدراسة تقنية التنقيب أخرى هي المسح الكهربائي. هذا هو أسلوب التحقيق الرأسي تهدف إلى تقييم قدرة المواد للسماح للتردد الحالي أو منخفضة المباشر. وهو يقوم، لذلك على قياس المقاومة الكهربائية ρ (في $\Omega.m$). فإنه يميز قدرة التيار الكهربائي إلى تعميم في البيئة الطبيعية؛ المعرفة تسمح لنا لفهم بنية والخصائص الصخرية لباطن الأرض. حقن تيار معروف من شدة وقياس توزيع القدرة الكهربائية، ونحن نقدم تقديرا للمقاومة (ρ_a) الطابق السفلي واضح.

كلمات السرية : التيار الكهربائي، استكشاف الأرض الكهربائية،

ABSTRACT

Electrical drilling is a very widespread process in several areas to find out the different rocks in a subsoil region, especially in hydrocarbon and water exploration. In recent decades, a major mobilization of methods and means of prospection increasingly performing.

Seismic prospecting consists of two methods; Seismic reflection that uses wave reflection on interfaces between several geological levels, and seismic refraction that uses the propagation of waves along the interfaces between geological levels.

In our work we studied another prospecting technique which is the electric sounding. It is a vertical investigation method designed to evaluate the ability of materials to pass the continuous or low frequency electrical current. It rests, therefore on the measurement of the electrical resistivity ρ (in $\Omega.m$). This characterizes the capacity of the electric current to circulate in the natural environment; His knowledge allows to understand the structure and the lithology of the subsoil. The injection of a current of known intensity and the measurement of the electrical potential distribution give us an estimate of the apparent resistivity (ρ_a) of the subsoil.

Key Words : Current, resistivity voltage, earthing, electrical sounding