

République Algérien Démocratique et Populaire
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique
Université de DJILALI BOUNAAMA KHEMIS MILIANA



Faculté des Sciences et de la Technologie
Département de Science de la Matière
Mémoire du projet de fin d'Etude
Pour l'obtention du diplôme de Master
En
PHYSIQUE
Spécialité : Physique du globe
SUJET

**Etude et réalisation d'un instrument géophysique conçu
pour le sondage électrique du sous-sol**

Réalisé par:

- Khawla Hamrat.
- Souad Chabani.

Soutenu le : 18/06/2018

Devant le jury :

) Mme. AMEL MAZOUZ	Présidente du jury
) M. ATMANE LAMALI	Encadreur
) M. LAMINE HAMAI	Co-encadreur
) M. SALAH EDDINE BENTRIDJ	Examineur

Année universitaire 2017/2018

Remerciements

Nous remercions nos encadrants Monsieur Atmane Lamali et Monsieur Lamine Hamai qui bien voulu diriger ce travail au long de son élaboration.

Nos vifs remerciements à Mme.MAZOUZ qui a bien voulu présider le jury. Nous tenons aussi à d'avoir remercié chaleureusement Monsieur S. BENTRIDJ accepté d'examiner ce travail.

Nos remerciements au à Monsieur kadi Djilali pour nous avoir fourni le soutien nécessaire pour la réalisation de l'étude comparative.

Nous remercions tous les enseignants qui nous ont encadré tout le long de nos études à l'université de Khemis Miliana.

Dédicace

A mon Père

A ma Mère

A mes sœurs et tous leurs enfants

A mes frères et tous leurs enfants

A tous mes amis

Khawla

Dédicace

Je dédie ce travail à mon cher père

A ma chère mère

A mon frère Mahmoud

A ma sœur Fatima et son mari Karim

A mon neveu Haitham

A mon binôme Khawla

A tous mes amis

Souad

Résumé

Dans le cadre de ce mémoire, nous avons abordé l'étude et la réalisation d'un instrument destinée pour le sondage électrique, depuis la simulation jusqu'à la réalisation pratique pour en finir avec les différents tests de laboratoire et de terrain d'expérimentation. Ainsi, suite aux différents tests très concluants dans chaque étape, nous sommes arrivés à statuer sur la fiabilité de la maquette réalisée. Nos résultats obtenus lors d'un sondage test, que ce soit par notre maquette ou par un instrument conventionnel de type ABEM, pour les mêmes conditions de terrain et les mêmes dispositions caractéristique du mode d'acquisition (mode Wenner), ne s'éloignent pas en termes de valeur de la résistance et/ou de résistivité apparente mesurée et ce, pour chaque test effectué en fonction de la variation du paramètre géométrique en jeu. Il est à conclure donc, que la maquette de l'instrument réalisée, a bien succédé à tous les tests que ce soit de laboratoire et/ou de terrain. A cet effet, nous estimons que notre maquette, même à son stade embryonnaire composée de moyens simples et rudimentaires et peut même servir d'instrument pédagogique pratique pour l'explication de la méthode de prospection en question.

Mots clés :

Géophysique, développement instrumental, sondage électrique, traitement du signal

ABSTRACT

In this study, we have carried out an instrumental conception which is devoted to the electrical survey in geophysics. At the first step, we have performed a software simulation of our electronic devices, and then we have assembled all devices in the laboratory. After that, the instrument conception undergo has several laboratory tests and filed experimentations. As a result, very conclusive tests at each experimental stage are obtained, and allow to approve the reliability of our prototype instrument model. Our

obtained results in the survey experimental mode are compared to those obtained by a conventional instrument ABEM model, in same field conditions and same characteristic of acquisition mode (Wenner mode). Indeed, the equivalent values for the measured resistance and/or apparent resistivity have been registered by both instruments are very conclusive, even according to the variation of the geometrical parameter that related to the survey mode. It is noteworthy to conclude that the conceived instrument model, after it has succeeded all the operating tests, may be consistently, even at embryonic stage of its conception with rudimentary devices and assay be used as very useful pedagogical instrument to explain the concerned prospecting method.

Keywords

Geophysics, instrumental conception, electrical survey, signal processing

Table des matières

Dédicace	
Remerciement	
Résumé	
Table des matières	
liste des figure	
Liste de tableaux	
Introduction général	1
Chapitre I: Problématique et rappels théoriques	
Introduction	3
1. Problématique	3
1.1. Introduction	3
1.2. Cas de notre étude	3
I.2. Rappels théoriques	4
I.2.1. Introduction sur la méthode de prospection électrique	4
I.2.2 Théorie fondamentale de la méthode électrique	5
a) Notion de résistivité électrique	6
b) La résistivité apparente	8
c). Définition d'un potentiel électrique	8
1) Cas d'une seule électrode de courant en profondeur	9
2) Cas d'une seule électrode à la surface	10
3) Cas de deux paires d'électrodes : le quadripôle	11
I.3 Cas pratique de la prospection électrique	12
I.3.1. Représentation des résultats	12
a) Sondage électrique sur deux couches	12
b) Sondage électrique sur trois couches	13
I.3.2. Les dispositifs des mesures dans la prospection électrique	14
a) Dispositif WENNER	14
B) Dispositif Schlumberger	15
c) Dispositif Pole-dipôle	15
d) Dispositif Dipôle- dipôle	16
I.3.3. Cas spécifiques	17

a) La mise à la masse	17
b) Trainé électrique	17
c) Tomographie électrique	17
d) Le sondage électrique	17
Chapitre II: Développement instrumental - banc d'essai	
II.1. Introduction	19
II.2. Banc d'essai	19
II.2.1. Schéma électronique adopté	19
A. Schéma synoptique	19
B. Schéma de câblage électrique et électronique détaillé	20
C. Simulation numérique du dispositif proposé	21
a) But de cette simulation	21
C.1 le montage de simulation	22
C.2. Les résultats de simulation	23
II.3. Réalisation et tests au laboratoire	25
Chapitre III: Terrain d'expérimentation et résultats	
III.1. Introduction	28
III.2: Aperçu sur le terrain d'expérimentation	28
a) Présentation du site	28
III.3. Réalisation de l'expérimentation	39
III.4: Résultats obtenu par la maquette du banc d'essai et l'instrument professionnel de type ABEM	32
III.4.1. Les différents tests réalisés	32
d) Tableau récapitulatif et comparatif	35
III.4.1. Discussion des résultats obtenus et conclusion	35
Conclusion	36
Bibliographie	

Liste de tableaux

<i>Tableaux III.1: résultat obtenu par ABEM (teste n 01)</i>	32
<i>Tableaux III.2: résultat obtenu par la maquette (test n 01)</i>	32
<i>Tableaux III.3 : résultat obtenu par ABEM (teste n 02)</i>	33
<i>Tableaux III.4 : résultat obtenu par la maquette (teste n02)</i>	33
<i>Tableaux III.5 : résultat obtenu par ABEM (teste n 03)</i>	34
<i>Tableaux III.6 : résultat obtenu par la maquette (teste n 03)</i>	34
<i>Tableaux III.7 : confrontation des résultants</i>	35

Liste de figure :

Chapitre I : *Problématique et rappels théoriques.*

Figure 1.1 : Schéma de principe d'une mesure électrique ou A et B.	5
Figure 1.2 : mesure de la résistivité en laboratoire.	6
Figure 1.3: potentiel généré par l'injection de courant Dans une surface sphérique.	9
Figure 1.4 : mesure de la résistivité en laboratoire	10
Figure 1.5: présentation d'un quadripôle.	11
Figure1.6 : sondage électrique deux couches.	12
Figure 1.7: sondage électrique trois couches.	13
Figure 1.8: dispositif wenner.	14
Figure 1.9: dispositif Schlumberger.	15
Figure 1.10 : dispositif Pole-dipôle.	15
Figure 1.11: dispositif Dipôle- dipôle.	16
Figure 1.12 : principe d'un sondage électrique	18

Chapitre II : *développement instrumental-banc d'essai*

Figure II.1: Schéma synoptique de la maquette final	19
Figure II.2 : Schéma de montage électronique de notre maquette.	20
Figure II.3 : illustration de tous les détails du montage simulé dans l'environnement du logiciel "NI Miltisim"	22
Figure II.4 : Signaux de commande des hacheurs "IGBT"	23
Figure II.5 : visualisation des signaux de sortie, courant (courbe rouge) et tension (courbe bleu) de l'onduleur simulé	24
Figure II.6: visualisation des signaux de sortie, image du courant (courbe vert) et tension (courbe orange) du redresseur simulé	24
Figure II.7: maquette finale réalisée au niveau du laboratoire LESI de L'UDBKM	25
Figure II.8 : visualisation à l'oscilloscope du signal de sortie de l'onduleur	26
Figure II.9: visualisation à l'oscilloscope du signale à la sortie du filtre de l'étage du redresseur suite à son teste par un générateur de fonction sinusoidales	27

Chapitre III : *Terrain d'expérimentation et résultats*

Figure III.1: Terrain d'expérimentation	28
Figure III.2 : L'équipement ABEM utilisé	29
Figure III.3: photo de notremaquettesur Terrain d'expérimentation	30
Figure III.4: photo de la mesure directe de la résistance donnée par ABEM et la mesure indirecte de notre maquette basée sur la loi d'Ohm	31

Introduction général

Introduction générale

De nos jours la géophysique appliquée connaît de plus en plus des progrès grâce à une instrumentation moderne et évolutive. C'est aussi grâce à la recherche en laboratoire par le biais de bancs d'essais que de nouveaux instruments sont développés et parfois en y allant pour résoudre un problème précis. A titre d'exemple, nous citerons le développement de la méthode de sondage par la Résonance Magnétique Protonique (RMP) où l'eau souterraine est localisée grâce à ses protons par le biais d'une instrumentation dédiée exclusivement pour cet objectif. C'est ainsi que le développement instrumental en géophysique permet d'innover et/ou d'améliorer les performances des méthodes classiques connues. C'est sur ce principe qu'est basée la contribution de ce modeste travail.

Cependant, les instruments géophysiques varient en termes de leur complexité, de leur taille, de leur utilisation dans le terrain et dépendent surtout de la nature des sources du signal à mesurer. Ces instruments ont tous un objectif commun consistant à mesurer la variation des propriétés physiques aussi bien sur le terrain qu'au laboratoire. C'est en effet, ces mesures qui nous renseignent des conditions de présence d'un gisement dans le sous-sol et sa manifestation en surface. Cependant, il existe plusieurs propriétés physiques qui sont exploitées dans la mesure instrumentale pour les investigations géophysiques où nous nous limitons ici qu'aux propriétés électriques du sous-sol via la mesure de la résistivité.

Pour ce faire, l'instrument qu'on compte étudier et réaliser dans le cadre de ce mémoire consiste à satisfaire le principe de la méthode électrique en géophysique en utilisant nos propres moyens pour le concevoir. En effet, la maquette qui est réalisée dans le cadre de ce mémoire est basée sur une électronique pas trop complexe, où nous avons fait usage des cartes électroniques préétablies avec des modifications appropriés et des ajouts adéquat pour la conception finale. Avant d'entamer cette réalisation une simulation numérique a été réalisée à des fins de dimensionnement et du suivi du comportement dynamique des composants électroniques. A l'issue des tous les tests au laboratoire et ceux des essais sur le terrain d'expérimentation, en comparaison avec l'instrument conventionnel commercialisé (type ABEM) dont dispose l'université, notre conception a été une réussite pour ces premiers pas tenant compte des résultats très concluants atteints. Nous donnerons plus loin plus de détails, depuis l'approche adoptée par rapport à la problématique, en passant par la simulation pour arriver enfin, à la réalisation puis aux différents essais de laboratoire et de terrain.

Ce mémoire est composé de trois chapitres distincts où dans le chapitre 1 seront revu tous les rappels théoriques liée à la méthode électrique en géophysique et ce, après avoir bien évidemment présenter la problématique de notre étude. Le deuxième chapitre sera consacré à la partie développement instrumental sur le plan simulation et réalisation. Le chapitre trois sera dédiée au terrain d'expérimentation, résultats obtenus et leur interprétation. Enfin, on terminera avec une conclusion générale sur travail.

Chapitre I

Problématique et rappels théoriques

Introduction :

Dans ce chapitre, nous présenterons la problématique liée à notre étude et notre approche à suivre pour la résoudre. A cet effet, nous donnerons certains détails pour la compréhension et la démarche à suivre dans chaque étape dans la réalisation de ce travail. Bien évidemment, nous donnerons aussi quelques rappels théoriques nécessaires dans le cas de cette étude.

1. Problématique

1.1. Introduction :

Il est connu de tous que l'instrumentation commercialisée demeure inaccessible par sa cherté sur le marché et donc, disposer d'une instrumentation pour satisfaire toutes les méthodes nécessite des gros moyens financiers. Notre objectif ici est de contribuer modestement à la conception de notre propre instrumentation dans ce vaste domaine, qui est la géophysique appliquée. Sachant que le développement instrumental en géophysique permet d'innover et/ou d'améliorer les performances des méthodes classiques connues, il est nécessaire d'avoir une plateforme de conception et de développement dans cet axe précis, d'autant que des cas d'études particulières nécessitent des investigations spécifiques et pourquoi pas à l'aide d'une instrumentation appropriée à concevoir.

1.2. Cas de notre étude :

Dans le cas de notre travail, l'instrument simple à première vue, qu'on compte étudier et réaliser dans le cadre de ce mémoire consiste à faire passer un courant électrique (aux caractéristiques spécifiques) dans le sous-sol et ce, en utilisant deux électrodes conventionnelles, puis procéder à la mesure simultanée du courant parcouru et la différence du potentiel (DDP) entre deux autres électrodes par des instruments standards (Multimètre en mode voltmètre et ampèremètre), qui serait enfin le résultat de la résistivité tant recherchée. Les mesures de ces deux entités (I & V) soit en valeur efficace et non en valeurs crêtes pour la précision de la mesure recherchée.

La maquette qui est réalisée dans le cadre de ce mémoire est basée sur une électronique pas trop complexe, où nous avons fait usage des cartes électroniques préétablies qui nous donnent

les signaux de départ. Ces derniers, nous les avons améliorés par un traitement adéquat, puis avant de les injecter dans le sous-sol, nous avons conçu un système d'inversion purement mécanique/manuel pour satisfaire le principe fondamental de la méthode électrique en géophysique (signal carré basse fréquence).

Avant d'entamer cette réalisation une simulation numérique a été réalisée. Cette simulation nous a permis de dimensionner nos composants électroniques et surtout de suivre leur comportement lors de leur fonctionnement en régime dynamique, à savoir la réaction aux variations brusques du courant et de tension. Une fois la réalisation achevée et que tous les tests au laboratoire étaient concluants, nous sommes passés aux essais sur le terrain d'expérimentation où la fiabilité et la performance ont été directement confrontées à celles obtenues par l'instrument conventionnel commercialisé (type ABEM) dont dispose notre université. A cet effet, un terrain argileux juxtaposant le laboratoire a été choisi pour cette comparaison en termes de résultats et de performances qui seront présentés plus loin.

I.2. Rappels théoriques

I.2.1. Introduction sur la méthode de prospection électrique :

Il s'agit ici de la méthode de prospection géophysique appliquée dans l'exploration du sous-sol. Cette méthode fait appel aux mesures du potentiel électrique généré par l'injection d'un courant continu(DC) dans le sous-sol. Cette méthode électrique d'étude de milieux souterrain. Il a été suggéré à cette époque l'usage de quatre électrodes pour les mesures de courant et de tension, plutôt que de deux pour la mesure de la résistance.(A MARIKO,1994)

Les sources de courant en méthode électrique sont divisées en deux types :

- Il y a celle provoquée (basée sur l'injection d'un courant électrique).
- Non provoquée(basée sur la mesure de la polarisation spontanée du sous-sol).

La polarisation spontanée (non provoquée) qui n'est pas notre cas ici ; mais dont on tiendra compte dans la conception de notre instrument, celle-ci est causée par l'activité électrochimique ou mécanique, tels l'altération des sulfures, la variation de la composition des roches aux contacts géologiques, l'activité bio électrique du matériel organique, corrosion, gradients thermiques et pression dans les fluides souterrains, etc. (Chouteau et Giroux., 2006)

I.2.2 Théorie fondamentale de la méthode électrique :

A la base, on mesure une résistivité électrique du sous-sol, cette méthode géophysique repose sur les propriétés électriques des roches. Le dispositif de mesure est constitué d'une source électrique, d'électrodes et d'une centrale d'acquisition. La mesure se décompose en trois étapes :(C. HAUCK et al)

-) Injection d'un courant i : depuis la source électrique par les électrodes d'injection.
-) Mesure de la différence de potentiel ΔV : entre les électrodes de mesure.
-) Calcul de résistivité apparente ρ_a : valeur qui découle de la loi d'Ohm
(Voir figure 1.1)

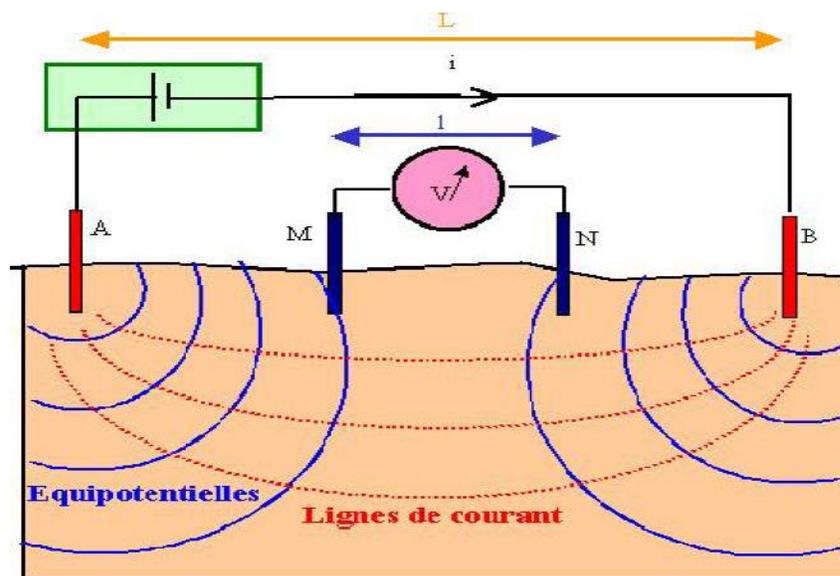


Figure I.1 : Schéma de principe d'une mesure électrique ou A et B
Sont les électrodes d'injection et MN sont les électrodes de mesure.

A) Notion de résistivité électrique.

En fait, la résistance R mesure l'opposition au passage d'un courant électrique, et peut permettre de caractériser un matériau. Selon la loi d'Ohm, la résistance électrique est donnée par le quotient du potentiel V appliqué aux bornes d'un matériau par le courant I qui le parcourt (V.K. MEHTA et al ; M. Telford et al)

$$R = \frac{V}{I} \quad (\text{Eq1.1})$$

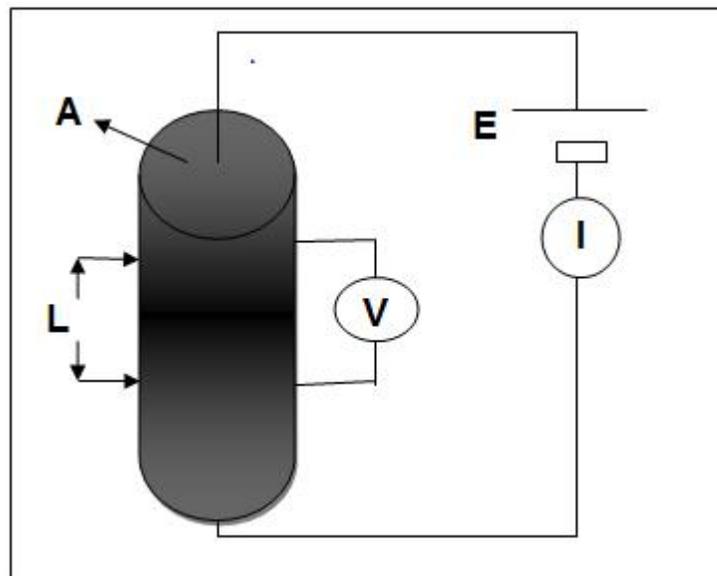


Figure I.2 : mesure de la résistivité en laboratoire

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 qui est liée à la résistance par.

Et ce, pour un cylindre de longueur L et de section A (Fig.1.2) :

$$\mathbf{R} = \frac{L}{A} \quad (\text{Eq.1.2})$$

L'inverse de cette résistivité est appelé la conductivité électrique $\sigma = \frac{1}{\rho}$ et leurs unités respectives : Ω/m et siemens/m.

Notons que la loi d'ohm sous la forme de l'équation $\mathbf{V} = \mathbf{R} \cdot \mathbf{I}$ (1.1) est une forme simplifiée de la forme générale qui s'écrit :

$$\vec{\mathbf{J}} = \sigma \vec{\mathbf{E}} \quad (\text{Eq.1.3})$$

Où $\vec{\mathbf{J}}$ est la densité du courant (courant par unité de surface traversée $\hat{\mathbf{J}} = \frac{\mathbf{I}}{S}$ (ampères/m²), et $\vec{\mathbf{E}}$ est le champ électrique. Par définition $\vec{\mathbf{E}}$ est le gradient du potentiel V (V est une fonction scalaire) talque (K Kumar Roy) :

$$\mathbf{V} = \frac{\partial}{\partial x} \mathbf{I} + \frac{\partial}{\partial y} \mathbf{J} + \frac{\partial}{\partial z} \mathbf{K} = -\vec{\mathbf{E}} \quad (\text{Eq.1.4})$$

Si on récrit la loi d'Ohm pour le cylindre de figure 1.2, on a alors d'où $\mathbf{E} = \frac{V}{L}$

$$\mathbf{V} = \mathbf{R} \quad (\text{Eq.1.5})$$

$$\mathbf{E} = \mathbf{R} \quad (\text{Eq.1.6})$$

$$\mathbf{E} = \frac{\mathbf{R}}{\frac{L}{A}} \cdot \vec{\mathbf{J}} \quad (\text{Eq.1.7})$$

$$\rho = \frac{E}{\vec{\mathbf{J}}} \quad \mathbf{m} \quad (\text{Eq.1.8})$$

Soit, maintenant, un terrain quelconque et dont il n'est pas nécessaire de supposer la surface plane. Il est toujours possible d'installer un quadripôle, de mesurer le courant \mathbf{I} et la différence du potentiel UV .

Le nombre obtenu est de même dimension qu'une résistivité. Mais ce ne saurait être la résistivité du terrain, puisqu'il n'est pas homogène. On nomme " **résistivité apparente** ", qu'on va définir ci-après.

b) La résistivité apparente :

La résistivité apparente est la valeur de la résistivité obtenue sur le terrain à partir du rapport UV/I . Elle résulte de la contribution volumique de toutes les parcelles du milieu traversé par le courant émis en fonction de la distance à la source. Elle est parfois définie comme la résistivité vraie d'un terrain imaginaire, homogène et isotrope, équivalent au terrain réel hétérogène (W.M. Telford et al)

c). Définition d'un potentiel électrique :

C'est le travail par unité de charge électrique qu'il faut appliquer pour déplacer une unité de charge d'un point du champ électrique à l'infini. S'il s'agit de déplacement de charge d'un point à l'autre ce sera la différence de potentiel

$$V = V_1 - V_2 \text{ (Eq.1.9)}$$

Le potentiel électrique s'exprime différemment selon le dispositif utilisé (Chouteau et Giroux, 2006)

1) Cas d'une seule électrode de courant en profondeur :

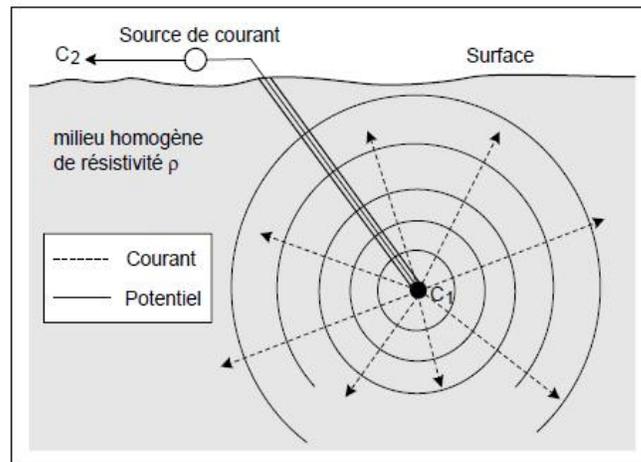


Figure I.3: potentiel généré par l'injection de courant Dans une surface sphérique.

$$\text{On a - } \mathbf{V} = \frac{\mathbf{d}}{\mathbf{d}} = \rho \quad (\text{Eq.1.10})$$

$$\text{Avec } \mathbf{j} = \frac{\mathbf{I}}{\mathbf{A}} = \frac{\rho}{4 R^2} \mathbf{d} \quad (\text{Eq.1.11})$$

$$\text{Par une simple intégration on obtient } \mathbf{V} = \frac{\rho}{4} + \mathbf{c} \quad (\text{Eq.1.12})$$

On suppose que le potentiel est nul très loin du point d'injection, ce qui supprime cette constante, tel que : (K Kumar Roy ; W.M. Telford et all)

$$\mathbf{V} = \frac{\rho}{4} \quad (\text{Eq.1.13})$$

2) Cas d'une seule électrode à la surface :

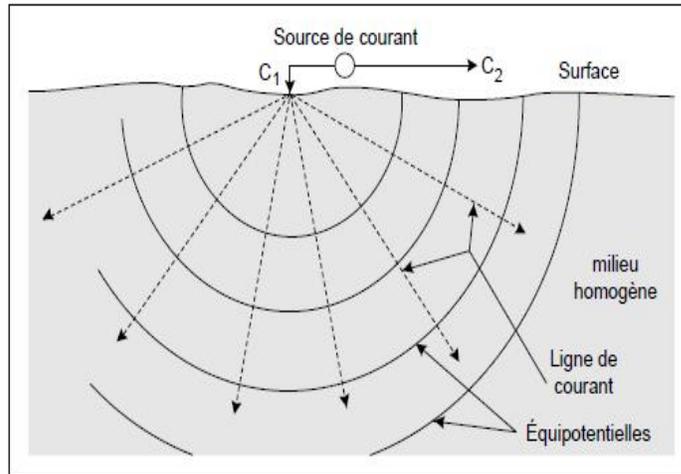


Figure I.4 : mesure de la résistivité en laboratoire

Il s'agit du cas du demi-espace homogène, dont :

$$\mathbf{j} = \frac{\mathbf{I}}{2r^2} \text{ (Eq.1.14)}$$

$$\mathbf{V} = \frac{\rho}{2} \text{ (Eq.1.15)}$$

3) Cas de deux paires d'électrodes : le quadripôle

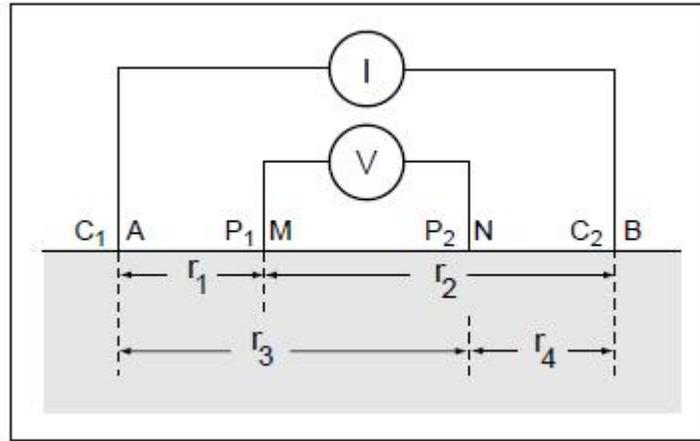


Figure I.5: présentation d'un quadripôle

Lorsque la distance entre deux électrodes du courant est finie, le potentiel en un point P est affecté par ces deux électrodes (Fig. I.5). Le potentiel au point P_1 dû à l'électrode C_1 est : (Kumar Roy ; W.M. Telford et all)

$$V_1 = \frac{I}{2} \frac{1}{r_1^2} \text{ (Eq.1.16)}$$

Et le potentiel au point P_2 dû à l'électrode C_2 est :

$$V_2 = \frac{I}{2} \frac{1}{r_2^2} \text{ (Eq.1.17)}$$

Puisque le courant qui sort par une électrode (C_1 ou A) est égal au courant qui entre par l'autre électrode (C_2 ou B), on peut écrire que

$$I_1 = -I_2$$

Le voltage total à P_1 (ou M) est :

$$V_1 + V_2 = \frac{I}{2} \left(\frac{1}{r_1} - \frac{1}{r_2} \right) \text{ (Eq.1.18)}$$

Ainsi, la différence de potentiel V entre deux électrodes sera :

$$V = \frac{\rho}{2} \left[\left(\frac{1}{r_1} - \frac{1}{r_2} \right) - \left(\frac{1}{r_3} - \frac{1}{r_4} \right) \right] \implies \rho = \frac{V}{I} \frac{2}{\left(\frac{1}{r_1} - \frac{1}{r_2} - \frac{1}{r_3} + \frac{1}{r_4} \right)} \text{ (Eq.1.19)}$$

I.3 Cas pratique de la prospection électrique :

Dans le cas pratique, il est souvent utilisé un dispositif bien déterminé pour pouvoir réaliser un sondage électrique proprement dit. Selon la figure (I.5), ce dispositif est représenté par deux électrodes à la base. Le courant injecté pénètre dans le sol par l'électrode A et en sort par l'électrode B. La répartition des lignes de courant se fait alors en volume. On peut donc repérer les variations de résistivité en profondeur. On mesure la différence de potentiel entre deux électrodes M et N. La résistivité déduite de cette mesure dépend de la géométrie du dispositif de mesure, à savoir K , qui est le coefficient géométrique du dispositif adopté (Lavoie., 1998)

I.3.1. Représentation des résultats

Les résultats d'un sondage électrique sont représentés sous forme d'un diagramme où l'on porte en abscisse la demi longueur de AB, soit OA, et en ordonnée la valeur de la résistivité apparente correspondante. L'échelle employée est bi-logarithmique, c'est-à-dire logarithmique sur les deux axes. (A MARIKO, 1994)

a) Sondage électrique sur deux couches :

L'effet de l'épaisseur du premier terrain h_1 est assez évident. Plus l'épaisseur du premier terrain est importante, plus il faudra un grand espacement pour obtenir la résistivité du second terrain. Cela est vrai pour n'importe quel dispositif adopté (voir Fig., I.6). (A MARIKO, 1994)

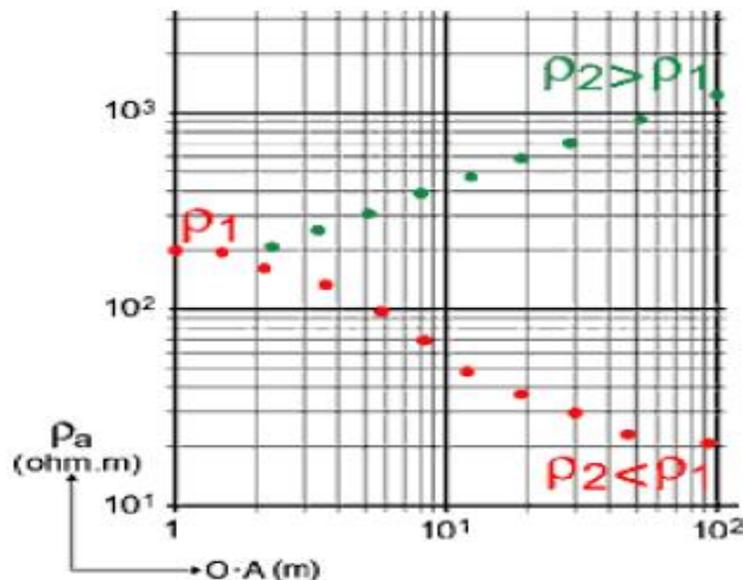


Figure I.6 : sondage électrique sur deux couches

b) Sondage électrique sur trois couches :

Si le sous-sol est composé de trois couches de résistivité 1, 2, 3 et d'épaisseur h_1, h_2 il y a alors quatre combinaisons possibles, voir la figure(I.7) ci-dessous :

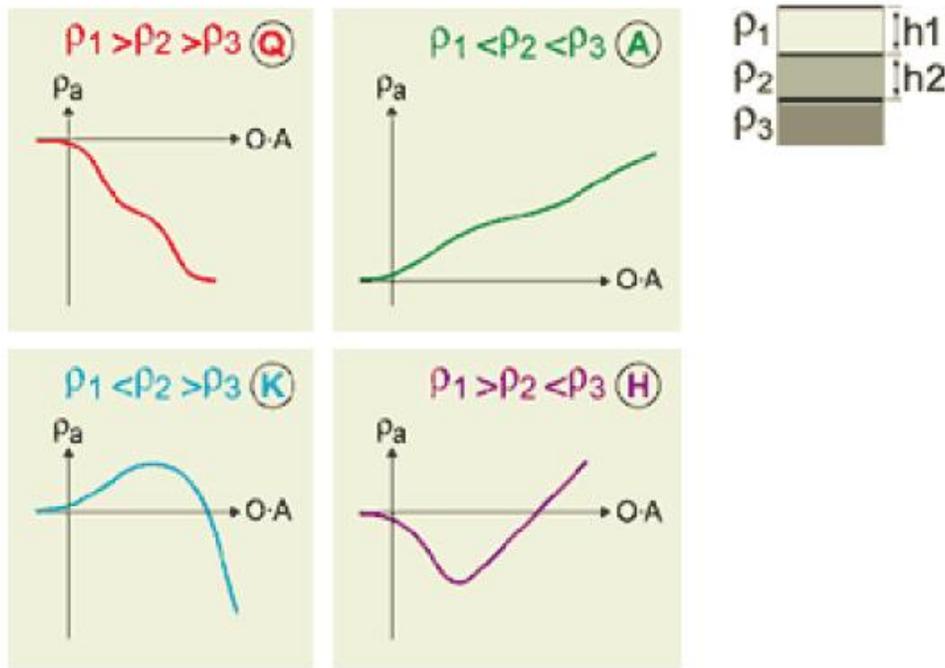


Figure I.7: Sondage électrique trois couches

L'interprétation des SE consiste, à partir de la courbe bi logarithmique représentant les résistivités apparentes en fonction des demi-longueurs de ligne AB, à calculer les résistivités vraies et les épaisseurs des différentes couches du sous-sol. En terme mathématique il s'agit de déterminer la fonction inconnue $\rho_a = f(h)$ à partir de la fonction $\rho_a = g(AB/2)$

L'interprétation est conduite en deux étapes :

- on essaye de calculer les épaisseurs et les résistivités vraies des terrains à partir de la courbe expérimentale du SE en se servant de courbes théoriques précalculées ou abaques généralement construits à partir de la relation $I_c \left(\frac{\rho_a}{\rho_1} \right) = I_c \left(\frac{A}{2} \right)$ pour différentes valeurs de $\frac{\rho_2}{\rho_1}$.

(MARIKO,1994)

I.3.2. Les dispositifs des mesures dans la prospection électrique

a) Dispositif WENNER :

Les quatre électrodes sont disposées sur un même alignement $A = M = N = B$. (W.M.Telford et al; D. H. GRIFFITHS, 1981)

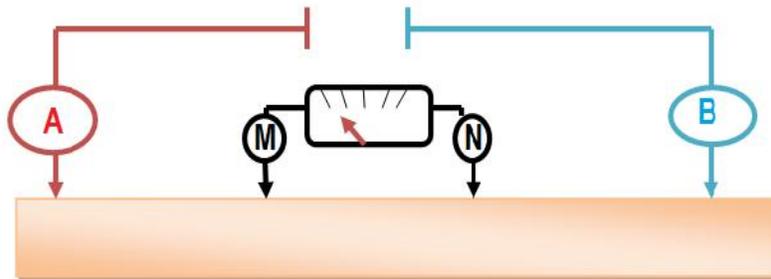


Figure I.8: Dispositif WENNER

Notons que $AM = r_1, MB = r_2, MN = r_3, NB = r_4$

$$K = \frac{Z}{\frac{1}{r_1} + \frac{1}{r_2} + \frac{1}{r_3} + \frac{1}{r_4}} \quad (\text{Eq.1.20})$$

$$K = \frac{Z}{\frac{1}{2} + \frac{1}{2} + \frac{1}{2} + \frac{1}{2}} \quad (\text{Eq.1.21})$$

$$K = 2 \quad (\text{Eq.1.22})$$

B) Dispositif Schlumberger.

Les quatre électrodes sont disposées sur un même alignement. La distance MN est petite par rapport à la distance AB. En général la distance $M < A / 5$.(W.M.Telford et al, D. H. GRIFFITHS et al,1981)

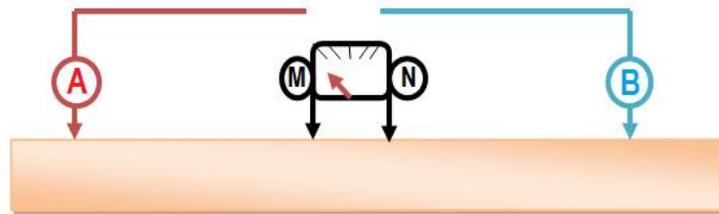


Figure I.9 : Dispositif Schlumberger

$$k = \frac{Z}{\frac{1}{A} + \frac{1}{B} + \frac{1}{B} + \frac{1}{A}} \text{ (Eq.1.23)}$$

c) Dispositif Pole-dipôle :

On rejette à l’infini une des quatre électrodes et on obtient un tripôle AMN ou ABM. Le tripôle le plus courant est celui où les trois électrodes sont disposées sur une même ligne droite. A étant à l’extérieur de MN.(W. M. Telford et al, D. H. GRIFFITHS et al,1981)

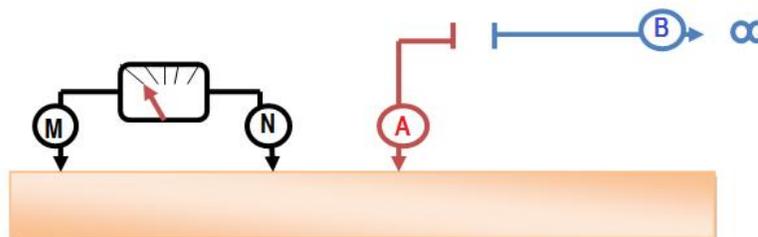


Figure I.10 : Dispositif Pole-dipôle

$$K = \frac{Z}{\frac{1}{a} - \frac{1}{b}} \text{ (Eq.1.24)}$$

$$\text{Soit } \mathbf{k} = \frac{\mathbf{z}}{\left(\frac{\mathbf{b}-\mathbf{a}}{\mathbf{a}}\right)} \text{ (Eq.1.25)}$$

Ce qui donne :

$$\mathbf{K} = \frac{\mathbf{z} \times \mathbf{a} \times \mathbf{a}}{\mathbf{b}-\mathbf{a}} \text{ (Eq.1.26)}$$

d) Dispositif Dipôle- dipôle :

Les quatre électrodes sont généralement disposées sur un même alignement et $AB=MN=2L$. La distance entre les 2 dipôles est variable. (W.M.Telford et all ;D, H.GRIFFITHS et al,1981)

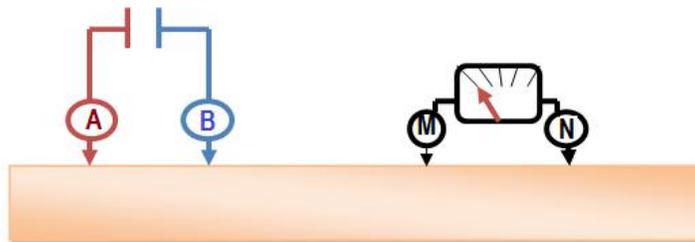


Figure I.11 : Dispositif Dipôle- dipôle

Notons que : $AM=2nL$ et $AN=2L(n+1)$

$$\mathbf{K} = \frac{\mathbf{z}}{\frac{\mathbf{1}}{\mathbf{n}} - \frac{\mathbf{1}}{(\mathbf{n}-\mathbf{1})(\mathbf{n}+\mathbf{1})}} \text{ (Eq.1.27)}$$

$$\mathbf{K} = \frac{\mathbf{z}}{\frac{\mathbf{1}}{\mathbf{2}} + \frac{\mathbf{1}}{\mathbf{2}(\mathbf{n}-\mathbf{1})} - \frac{\mathbf{1}}{\mathbf{2}(\mathbf{n}+\mathbf{1})} + \frac{\mathbf{1}}{\mathbf{2}}} \text{ (Eq.1.28)}$$

$$\mathbf{K} = \mathbf{z} (\mathbf{n} - \mathbf{1})\mathbf{n}(\mathbf{n} + \mathbf{1}) \text{ (Eq.1.29)}$$

I.3.3. Cas spécifiques

a) La mise à la masse.

L'électrode d'émission est remplacée par un gisement conducteur dans lequel on injecte le courant. C'est un quadripôle dont B et M sont à l'infinie (plantés très loin). L'ensemble du gisement joue alors plus ou moins le rôle d'électrode de courant, toute sa surface se mettant sensiblement au même potentiel. Cette méthode utilisée en recherche minière. (C. HAUCK et al)

b) Trainé électrique.

Il s'agit simplement de déplacer un quadripôle AMNB de dimension fixe sur le site à explorer, à chaque station on fait une mesure de ρ_a et de V qui permet de calculer ρ_a qu'on affecte au centre du dispositif. Un trainé est aussi appelé profil. (W. M. Telford et al, 2008)

c) Tomographie électrique.

La méthode de tomographie électrique fut mise au point dans le but d'obtenir un modèle du sous-sol ou la répartition de la résistivité qui varie verticalement et horizontalement le long du profil. En déplaçant le dispositif en augmentant la distance AB, on peut mieux imaginer. On définit alors une pseudo-section. Les données mesurées sont représentées sous forme de sections de contour ou de couleur. L'axe vertical est une pseudo-profondeur proportionnelle à l'écartement des électrodes. (C. HAUCK et al, 2008)

d) Le sondage électrique :

L'exécution d'un sondage électrique, c'est qu'on recherche comment varie, en un point donné de la surface, la résistivité du sous-sol à la verticale. Pour cela on exécute en un même endroit une succession de mesures, en augmentant chaque fois toutes les dimensions du dispositif, et de ce fait la profondeur d'investigation qui leur est proportionnelle. Lorsqu'on injecte un courant dans le sol, les lignes de courant pénètrent à une profondeur théoriquement infinie. On a cependant démontré que pour une longueur de ligne AB constante, la densité de courant diminue avec la profondeur. Un corps produit une distorsion des lignes équipotentielles d'autant plus importante que la densité de courant est forte. Donc, si le corps est profond, la ligne AB est grande. C'est le principe des sondages électriques : disposant d'un quadripôle AMNB, on

fait varier la longueur AB en laissant le point O au centre de AB et de MN fixe (W. M. Telford et all)

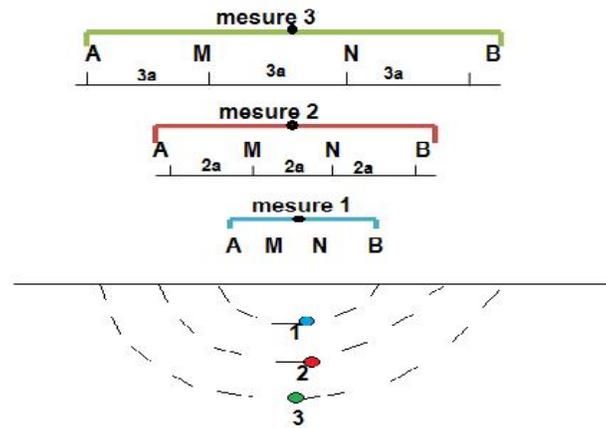


Figure 1.12: Principe d'un sondage électrique

Chapitre II

Développement instrumental - banc d'essai

II.1. Introduction :

Dans ce chapitre, nous présenterons les différentes étapes suivies pour la réalisation de notre instrument de sondage électrique. Dans la première étape, nous allons présenter le schéma global adopté de la maquette électronique. Puis, les donnerons nos résultats de la simulation dont la contribution était primordiale pour passer vers la dernière étape, qui consiste en la réalisation au laboratoire avec les différents tests que nous lui avons fait subir.

II.2. Banc d'essai :

II.2.1. Schéma électronique adopté :

A. Schéma synoptique

La figure II.1 illustre notre schéma synoptique suivi pour la réalisation de notre instrument. Ce dernier est composé essentiellement de trois compartiments (étages) distincts. Le premier étage est celui d'un convertisseur DC/AC qui le travail de survolteur. Le deuxième étage est celui d'un convertisseur AC/DC qui fera objet de générateur du signal énergétique d'injection. Le dernier étage est celui d'un inverseur à concevoir pour piloter le signal à l'injection.



Figure II.1 : Schéma synoptique de la maquette finale

B. Schéma de câblage électrique et électronique détaillé.

La figure (II.2) ci-dessous, donne le schéma du montage électronique détaillé de notre maquette ou tous les étages sont représentés de façon détaillée vis-à-vis des éléments qui la compose. Ces éléments sont : la source d'énergie de départ (batterie), le convertisseur DC/AC (onduleur), le convertisseur AC/DC (redresseur), à l'inverseur et les appareils de mesures qui permettent de mesurer le paramètre physique la méthode que compte satisfaire notre instrument, à savoir le sondage électrique en géophysique appliquée.

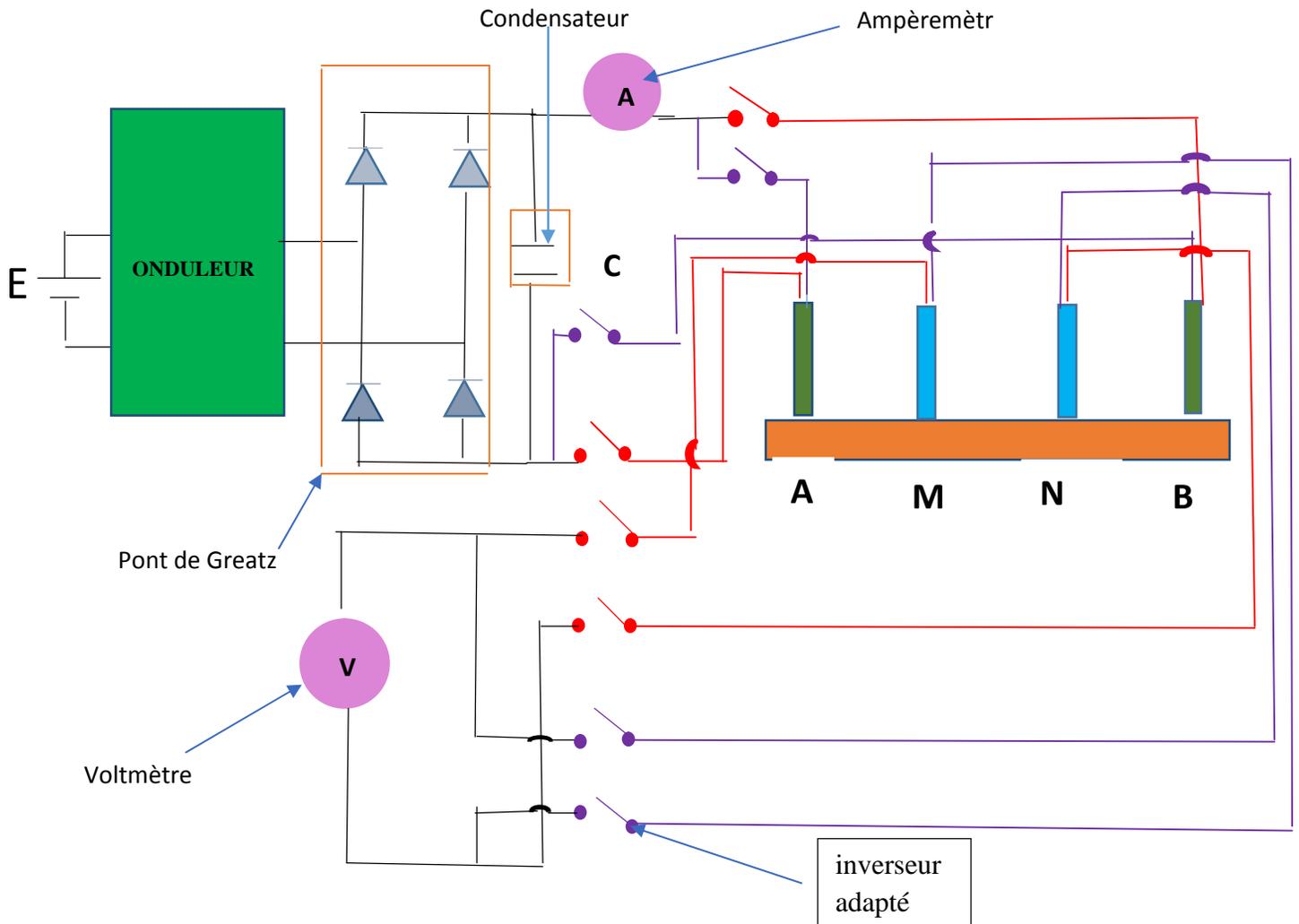


Figure II.2 :Schéma de montage électronique de notre maquette

A.Simulation numérique du dispositif proposé

a) But de cette simulation :

Bien évidemment, avant d'entamer la réalisation pratique de notre maquette (Fig. II.2), une simulation numérique de son schéma électronique a été effectuée sous le logiciel de simulation électronique, qui est en l'occurrence « NI Multisim », version 13, développé par National Instruments et qui n'est autre que, la version améliorée du fameux logiciel « Electronicworkbench ». Des simulations Matlab ont été aussi tentées surtout pour la partie « Onduleur », mais au regard de certaines limites de Matlab dans le volet sur le plan d'électronique, la simulation globale a été finalement réalisé par NI Multisim. Le but de cette simulation est la visualisation des signaux traités (partie traitement du signal) dans chaque étage de notre maquette et ce, afin de pouvoir suivre et comprendre le comportement dynamique de l'ensemble des éléments constitutifs de chaque étage. Ceci nous permettra vers la fin le bon dimensionnement de nos composants électroniques que devrait comporter chaque étage.

C.1 le montage de simulation.

La figure II.3 montre tous les détails du montage simulé dans l'environnement de logiciel utilisé (NI Multisim), avec surtout les dispositifs de mesure et revisualisations des différentes sortie (courant/tension) dans chaque étage.

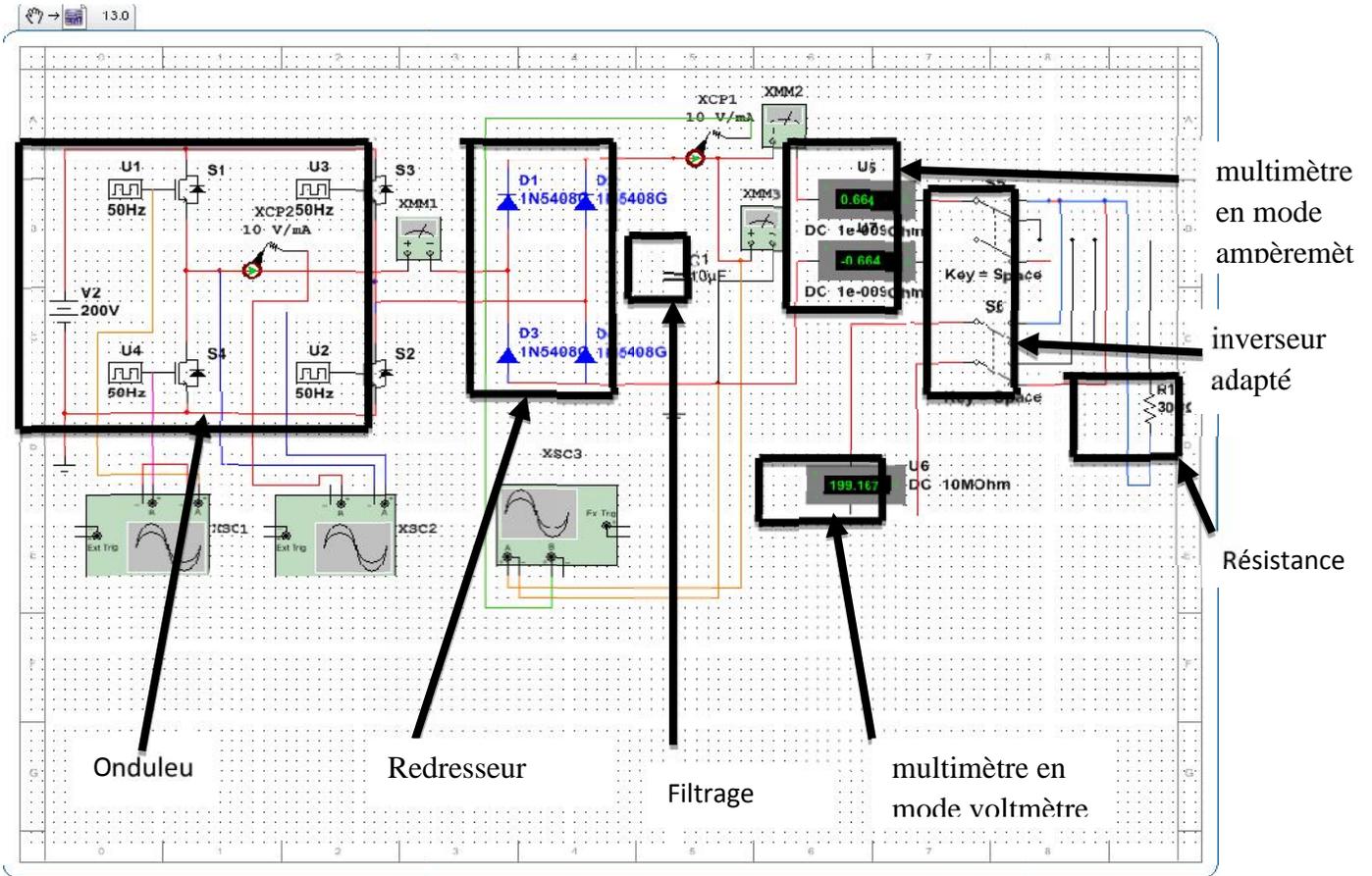


Figure II.3 : Illustration du montage simulé dans l'environnement du logiciel « NI Multisim ».

C.2. Les résultats de simulation :

La figure II.4 montre d'abord la visualisation des signaux de commande des hacheurs (type IGBT) au niveau de l'étage onduleur, en opposition de phase avec une fréquence avoisinant 50 Hz, lesquels commandent chaque paire d'un bras du pont de l'onduleur simulé. Les couleurs permettent distinguer chacun de ces signaux de commande.

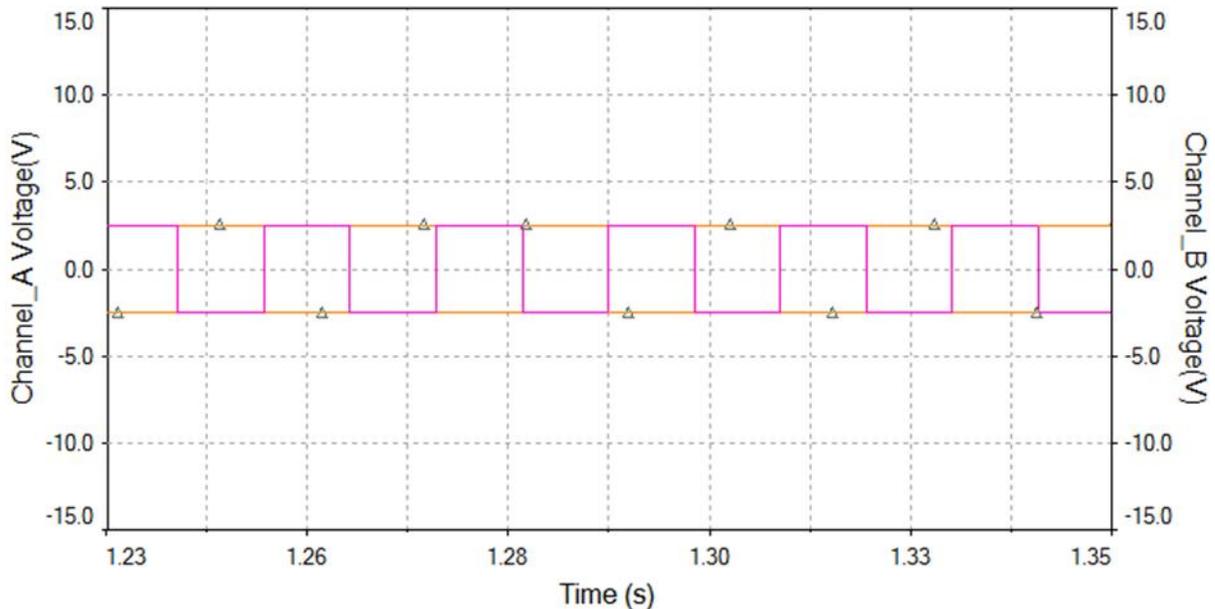


Figure II.4 : Signaux de commande des hacheurs « IGBT »

On remarque une certaine stabilité en utilisant un signal carré pour la commande des hacheurs IGBT. En effet, on doit s'assurer qu'au niveau de la commande on n'a pas d'oscillations indésirables

La figure II.5 montre la visualisation des signaux de sortie (tension et courant) de l'onduleur simulé, résultant des signaux de commande précédents (fg. II.4). L'intérêt est porté ici sur les variations brusques du courant (voir courbe rouge, Fig. II.5) dont on remarque des pics à chaque discontinuité due au hachage par les IGBT. En termes de limitation, pour la tension (voir courbe bleu, Fig. II.5) mise en jeu dans notre maquette et simulée ici, ces variations sont tolérables (ne dépassant les 1.5 A crête), à condition de choisir les composants supportant ces surintensités au niveau de l'étage suivant qui va les recevoir (redresseur).

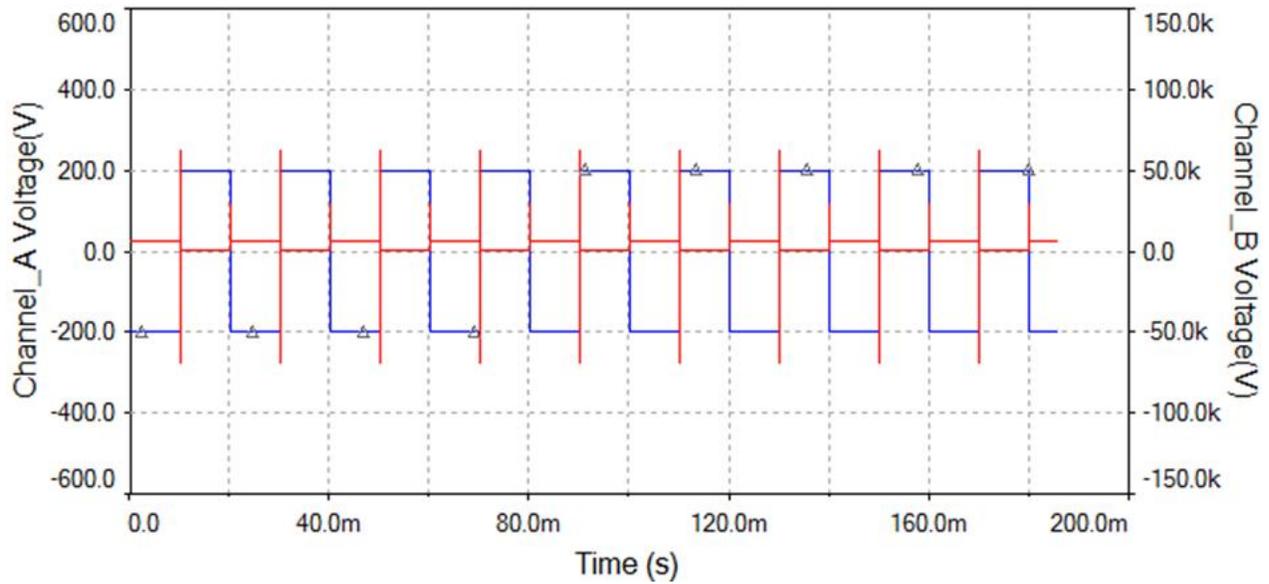


Figure II.5 : Visualisation des signaux de sortie, courant (courbe rouge) et tension (courbe bleu) de l'onduleur simulé

La figure II.6 montre quant à elle, la visualisation les signaux de sortie (tension et image du courant) du redresseur simulé, résultant des composants choisis en fonction des signaux de sortie de l'onduleur. Nous remarquons que ces deux entités (courant et tension) ont été bien filtrées grâce au choix adéquat des composants électroniques pour cet étage.

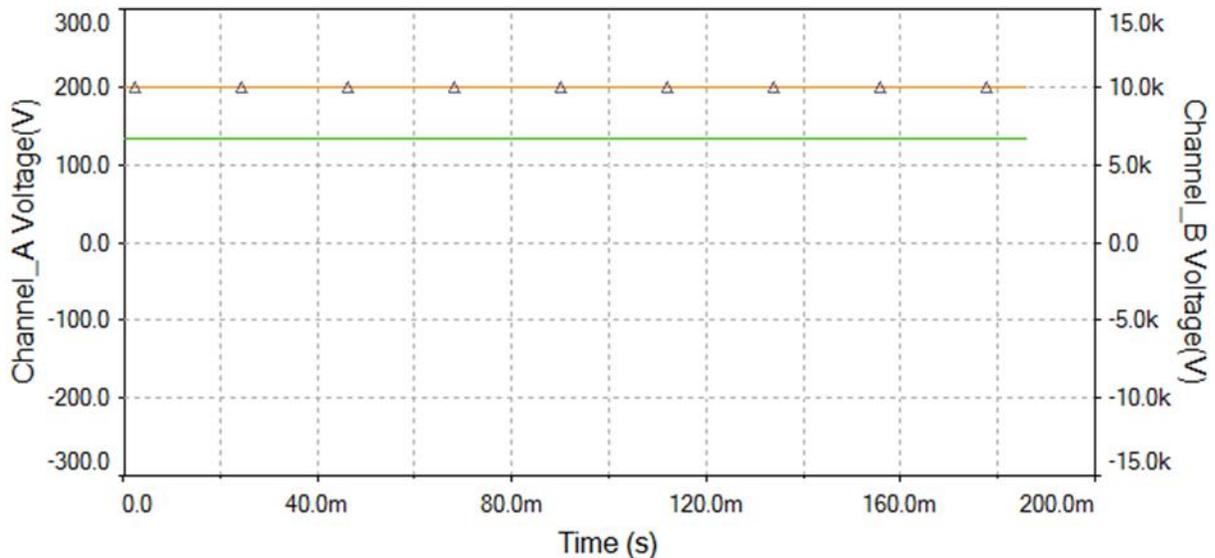


Figure II.6 : Visualisation des signaux de sortie, image du courant (courbe verte) et tension (courbe orange) du redresseur simulé

Enfin, dans la figure II.7, il a été aussi question de la simulation de notre inverseur et la charge supposée représenter la résistance de notre sous-sol. En plus de la visualisation des signaux, dans cette partie il est aussi question des mesures de nos entités électrique (I et V) qu'absorbera notre charge résistive simulant le sous-sol. En effet, les mesures enregistrées ont contribué au dimensionnement des éléments de notre inverseur et de s'assurer des polarités qui devraient être respectées à l'injection.

II.3. Réalisation et tests au laboratoire :

A l'issue des résultats de notre simulation, nous avons regroupé toutes les parties à mettre à contribution pour la réalisation finale de notre maquette au laboratoire (Fig. II.8).

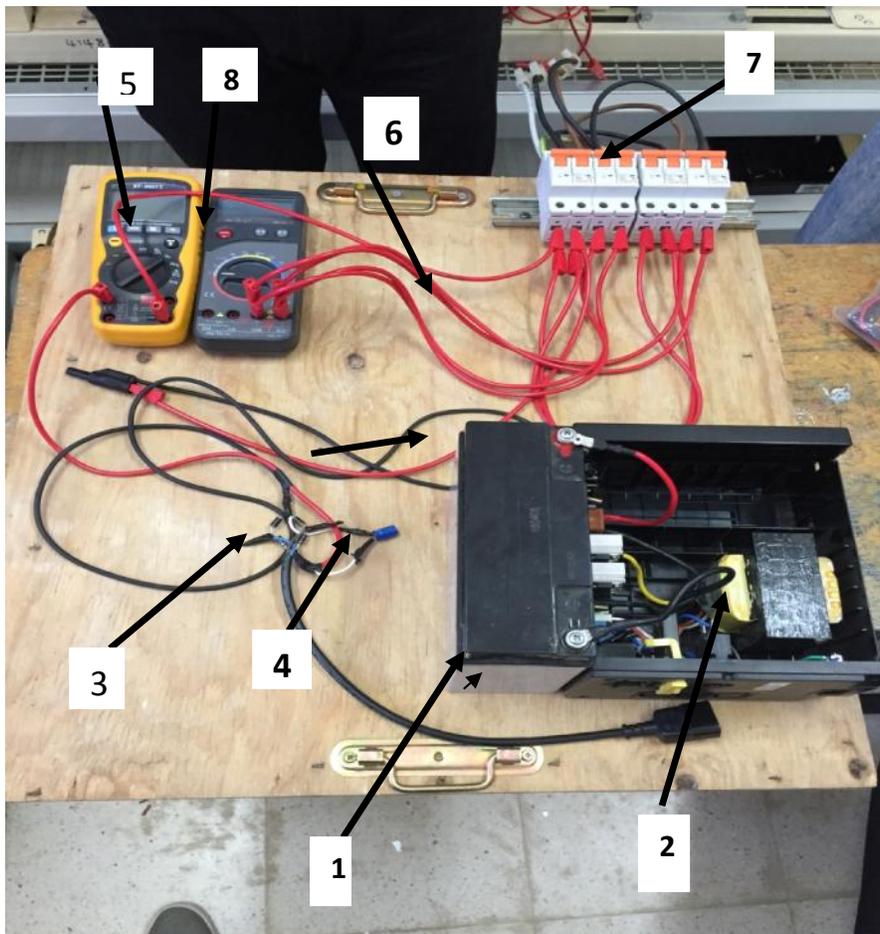


Figure II.7: Maquette finale réalisée au niveau du laboratoire LESI de l'UDBKM

- 1) Batterie.
- 2) Onduleur
- 3) Redresseur
- 4) Filtrage
- 5) multimètre en mode ampèremètre
- 6) Câbles
- 7) inverseur adopté
- 8) multimètre en mode voltmètre.

-) Pour le convertisseur DC/AC, nous avons adopté une carte préétablie d'un onduleur d'une puissance de 500 VA en sortie.
-) Pour le redresseur et le filtrage, nous avons aussi choisi des composants qui supportent les valeurs de sortie de l'onduleur que nous avons visualisé par biais d'un oscilloscope en utilisant une sonde spécifique (Fig. II.8).

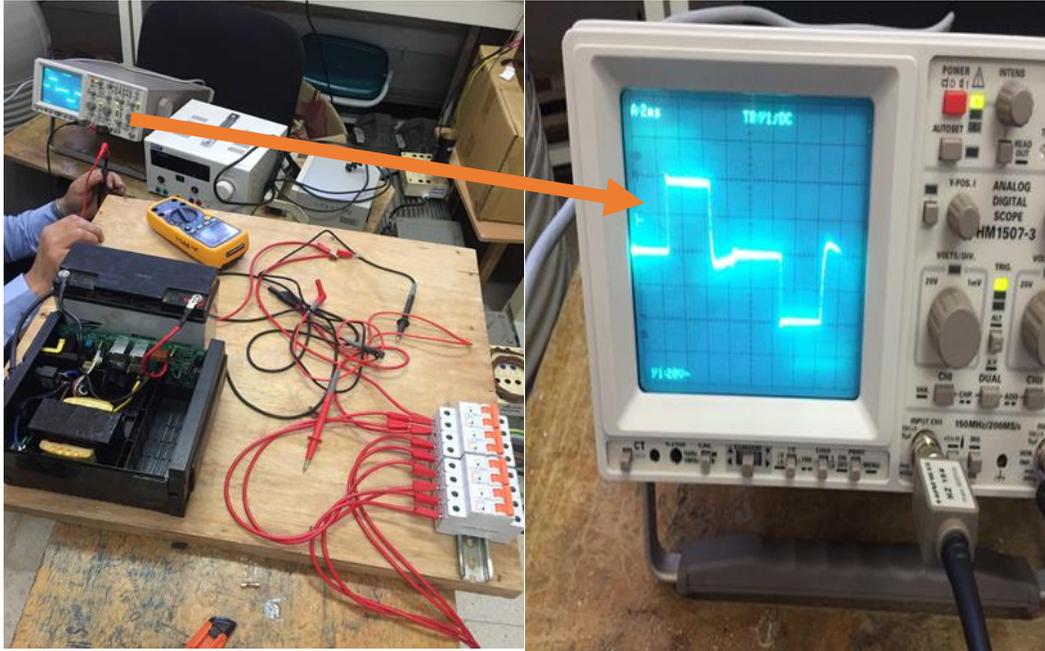


Figure II.8 : Visualisation à l'oscilloscope du signal de sortie de l'onduleur

-) Les pics de courants au niveau des discontinuités visualisés et montrés dans la figure II.8 (comme montré également par notre simulation (Fig. II.5), ont été largement supportés par nos composants dimensionnés au niveau du redresseur et son filtrage (Fig. II.9) et ce, suite aux différents tests opérés sur notre maquette expérimental (Fig. II.8).

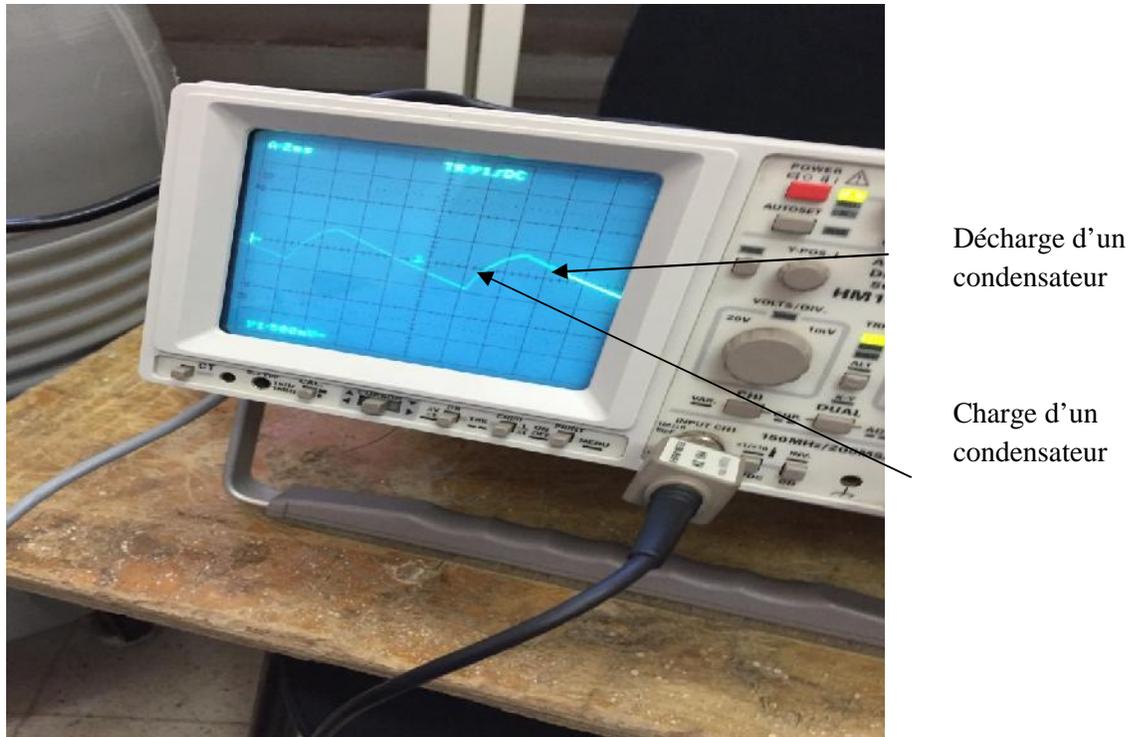


Figure II.9 Visualisation à l'oscilloscope du signal à la sortie du filtre de l'étage du redresseur suite à son test par un générateur de fonctions sinusoïdale

Il est à conclure que suite à tous ces différents tests, notre maquette se voit maintenant entièrement prête pour être confronté à la réalité des tests de terrain et surtout en opposition avec une instrumentation conventionnelle (Type ABEM) dont dispose notre université. Cette partie sera développé en détail dans le chapitre suivant

Chapitre III

Terrain d'expérimentation et résultats

III.1. Introduction :

Dans ce chapitre, nous allons présenter nos résultats issus du terrain d'expérimentation auquel est confrontée notre maquette expérimentale. Nous allons donner plus de détails sur le choix de terrain et le déroulement de l'expérimentation de notre maquette en comparaison avec l'instrument conventionnel (type ABEM).

III.2: Aperçu sur le terrain d'expérimentation :**a) Présentation du site :**

En effet, une fois avoir assuré que tous les différents tests subis par notre maquette au laboratoire sont concluants, nous avons choisi un terrain argileux pas loin du laboratoire LESI à l'UDBKM. Ce terrain est d'âge miocène moyen dont les valeurs de résistance ne s'éloignant pas de celle que nous avons déjà modélisé et simulé pour des cas extrêmes de charge de notre maquette instrumentale (Fig. II.1).

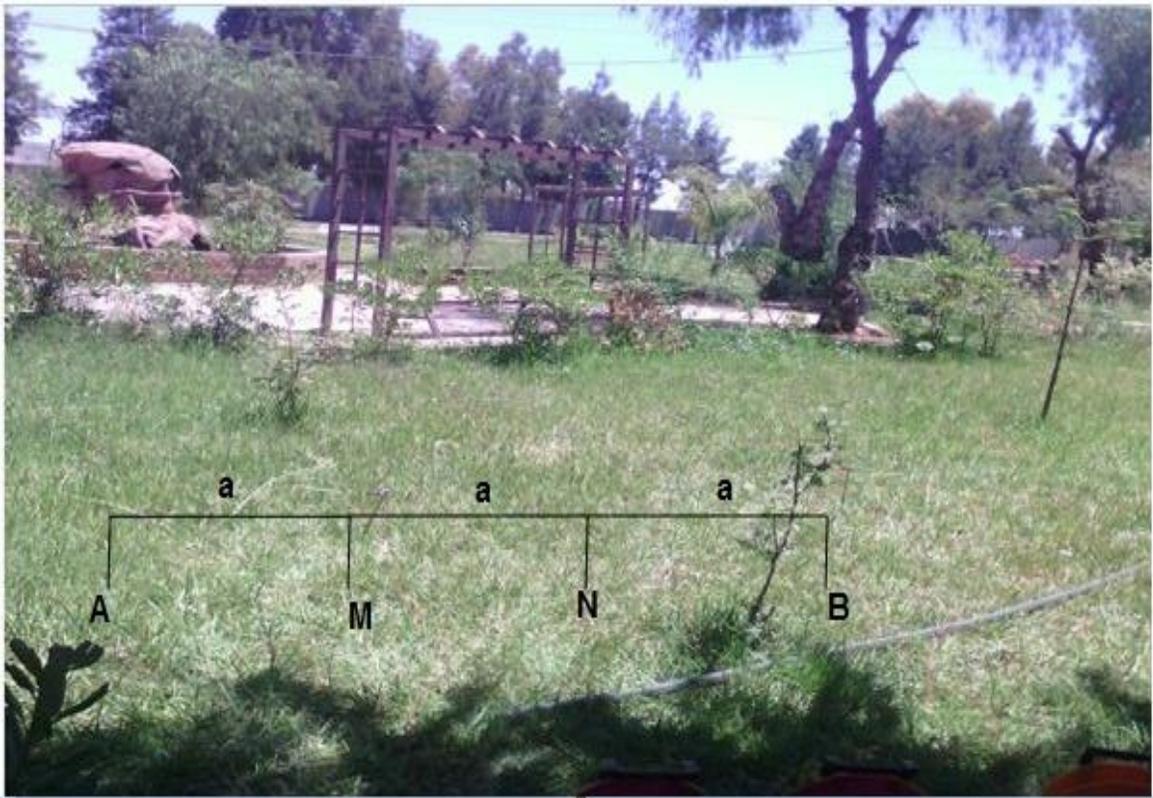


Figure III.1: Terrain d'expérimentation

III.3. Réalisation de l'expérimentation :

Pour procéder à cette expérimentation au niveau du terrain sélectionné, nous avons d'abord adopté le dispositif de sondage électrique adéquat pour faire subir ces différents tests de terrain à notre maquette en comparaison avec une instrumentation conventionnelle (Type ABEM). Il s'agit du dispositif « type Wenner » (voir Fig. III.1 et le chapitre I pour les rappels théoriques), où les distances entre les électrodes d'injection AB et de mesure MN disposées sur le même alignement, sont appelées à varier suivant une configuration toujours identique $AB=MN=NB$.

a) **Pour l'ABEM** : Les différents équipements qui le composent, nous les avons regroupés sur le terrain comme suit (Fig. III.2) :

1. Un résistivimètre :(pour enregistrer les données)
2. 4 électrodes : deux électrodes A et B pour l'injection du courant et les deux autres M et N pour mesurer la différence du potentiel
3. Un marteau : pour implanter les électrodes dans le sol
4. 4 bobines des câbles électrique
5. Des câbles électriques pour relier les éléments
6. Une batterie (pour l'alimentation de tout le système)
7. Décamètre



Figure III. 4 : l'équipement ABEM utilisé

a) Pour notre maquette

Les éléments constitutifs sont composés de notre maquette réalisée au laboratoire et les différents équipements qui composent l'instrument ABEM à l'exception de la console du « résistivimètre » (Fig. III.3) :



Figure III.3:Photo de notre maquette sur le terrain d'expérimentation.

c) Les différentes mesures réalisées :

La figure III.4 montre une des photos de terrain lors de la mesure directe de la résistance donnée par ABEM et la mesure indirecte de notre maquette basée sur la loi d'Ohm pour le même sondage adopté.

Lecture de I sur l'ampèremètre



Lecture de R sur le résistivimètre

Figure III.4 : Photo de la mesure directe de la résistance donnée par ABEM et la mesure indirecte de notre maquette basée sur la loi d'Ohm.

III.4: Résultats obtenu par la maquette du banc d'essai et l'instrument professionnel de type ABEM :

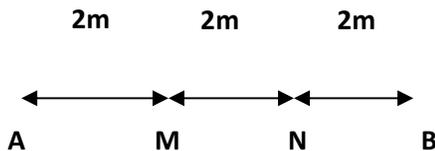
III.4.1. Les différents tests réalisés :

On a : $\rho = R \cdot K$ ou $K(W) = 2$ et $R = \frac{\Delta V}{I}$

Avec K est la confession géométrique.

a) Test n° 1 :

Configuration n° 01 (la distance entre les électrodes est a= 2m)



1/ Les mesures par ABEM :

AB/2 (m)	V (V)	I (m A)	R ()	Erreur %	K	ρ (.m)
3	0.353	200	1.7978	3	12.56	22.591

Tableaux n° 1 : Résultats obtenus par ABEM (test n° 01)

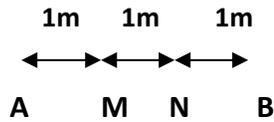
2/ Les Mesure par notre maquette :

AB/2 (m)	V(V)	I (A)	R ()	Moyenne	K	(.m)
3	0.65	0.36	1.8055	1.855	12.56	23.298
3	0.82	0.43	1.906			

Tableaux n° 2: Résultats obtenu par notre maquette (test n° 01)

b) Test n° 2:

Configuration n° 02 (la distance entre les électrodes est à = 1 m)



1/ Les mesures par ABEM :

AB/2 (m)	V(v)	I(m A)	R ()	Erreur (%)	K	(.m)
1.5	0.752	200	3.76	3	6.28	23.612

Tableaux n°3 : Résultats obtenus par ABEM (test n° 02)

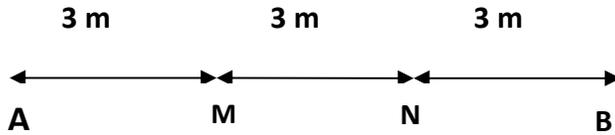
2/ Les Mesure par notre maquette

AB/2 (m)	V(v)	I(A)	R ()	Moyenne	K	(.m)
1.5	2.42	0.6	4.033	3.984	6.28	24.9944
1.5	2.40	0.61	3.93			

Tableaux n°4 : Résultats obtenus par notre maquette (test n° 01)

c) Test n° 3 :

Configuration n 03 (la distance entre les électrodes est 3 m)



1/ Les mesures par ABEM :

AB/2 (m)	V(v)	I(m A)	R ()	Erreur (%)	K	(.m)
4.5	0.247	200	1.235	3	18.84	23.279

Tableaux n°5 : Résultats obtenu par ABEM (test n° 03)

2/ Les Mesure par notre maquette

AB/2 (m)	V(v)	I (A)	R ()	Moyenne	K	(.m)
4.5	0.551	0.45	1.135	1.2325	18.84	23.22
4.5	0.640	0.48	1.33			

Tableaux n°6 : Résultats obtenu par notre maquette (test n° 03)

d) Tableau récapitulatif et comparatif

Le tableau n° 7 présente enfin, les résultats récapitulatif et comparatif ABEM-notre maquette.

Tests	par notre maquette en (.m)	Par l'ABEM en (.m)	$\frac{\Delta\rho}{\rho}$
a=1m	22.99	23.612	± 0.0042
a=2m	23.3	22.591	± 0.0043
a=3m	23.22	23.279	± 0.0083

Tableaux n°7 : confrontation des résultats.

III.4.1. Discussion des résultats obtenus et conclusion :

Il est à remarquer que les résultats, obtenus que ce soit par notre maquette ou par l'ABEM pour la même disposition d'électrodes en mode Wenner, ne s'éloignent pas en termes de valeur de la résistance mesurée et ce, pour chaque test effectué en fonction de la variation du paramètre géométrique en jeu (voir les tableaux 1 à 6 ci-dessus, récapitulant les résultats des trois tests réalisées). Ceci est confirmé également par le tableau comparatif (Tableau n° 7) en termes de résistivité apparente. Même l'écart en termes d'erreur entre les deux instruments est largement négligeable (Tableaux 1 à 6). Il est aussi à remarquer que dans les deux cas, que ce soit pour l'ABEM et/ou pour notre maquette. Il est à conclure donc, que la maquette de l'instrument de sondage électrique réalisée dans le cadre de ce travail, a bien succédé à tous les tests que ce soit de laboratoire et/ou de terrain. Même à son stade embryonnaire composée de moyens simples et rudimentaires. Elle peut à ce stade, d'ores et déjà, servir de banc d'essais sur le plan pédagogique au niveau du laboratoire et pour les futurs impétrants en physique du globe de notre faculté.

Conclusion général

Conclusion général

Dans le cadre de ce modeste travail, nous avons abordé l'étude et la réalisation d'un instrument destiné pour le sondage électrique, depuis la simulation jusqu'à la réalisation pratique pour en finir avec les différents tests de laboratoire et de terrain d'expérimentation. Chaque étape réalisée durant toute cette étude, a été une formation de plus dans notre cursus suivi. Ainsi, suite aux différents tests très concluants dans chaque étape achevée, nous sommes arrivés à statuer sur la fiabilité de la maquette réalisée.

En effet, tous les résultats obtenus lors d'un sondage test, que ce soit par notre maquette ou par l'instrument conventionnel l'ABEM, pour les mêmes conditions de terrain et les mêmes dispositions caractéristiques du mode d'acquisition (mode Wenner), ne s'éloignent pas en termes de valeur de la résistance mesurée et ce, pour chaque test effectué en fonction de la variation du paramètre géométrique en jeu. Ceci a été confirmé également à l'évidence en termes de résistivité apparente. Il est aussi à remarquer que la réaction de notre instrument est totalement satisfaisante en termes de compensation courant/tension en fonction de la résistance du terrain et ce, du fait que les deux instruments ont bien révélé de la même façon les variations des paramètres électriques du terrain prospecté.

Il est à conclure donc, que la maquette de l'instrument du sondage électrique réalisée dans le cadre de ce travail, a bien succédé à tous les tests que ce soit de laboratoire et/ou de terrain. Elle peut à ce stade, d'ores et déjà, servir de banc d'essais sur le plan pédagogique au niveau du laboratoire et pour les futurs impétrants en physique du globe de notre faculté.

Toutefois, l'instrument qui est développé dans le cadre de ce travail pourrait se moderniser par la suite et devenir plus performant, juste avec une numérisation équivalente de l'ensemble des parties qui le compose.

Bibliographie

- [1] A. MARIKO, Mémoire de D.E.S.S. DeGÉOPHYSIQUE APPLIQUÉE ; APPLICATION DES MÉTHODES ÉLECTRIQUES ET MAGNÉTIQUES À L'ÉTUDE DES SOLS FERRALITIQUES: bassin versant de NSIMI (sud-CAMEROUN),1994.
- [2]A. Ghristine Lavoie. Mémoire de maîtrise. Application de la méthode des sondages électrique à la caractérisation des aquifère et des dépôts meubles, basses –terres du st-Laurent, région nord de Montréal (institut national de la recherche scientifique- Eau.1998).
- [3] D. H.GRIFFITHS, Applied Geophysics for Geologists and Engineers; Copyright1981.
- [4] K. Kumar Roy, Potential Theory in Applied Geophysics ;Springer-Verlag Berlin Heidelberg 2008
- [5] M. Chouteau et B. Giroux. Géophysique appliquée II. GLQ 3202. (Méthodes électrique notes de cours).2006
- [6] V.K.MEHTA and R. MEHTA, objective electrical technology; S. CHAND & COMPANY LTD 2002
- [7]W.M. Tlefford, L.P. Geldart and R.E. Sheriff, Applied geophysics; Cambridge university press 1990