



UNIVERSITÉ D'ANTANANARIVO
DOMAINE DES SCIENCES ET TECHNOLOGIES
MENTION PHYSIQUE ET APPLICATIONS



MÉMOIRE

pour l'obtention du

DIPLÔME DE MASTER EN PHYSIQUE ET APPLICATIONS

Parcours : Physique du Globe

Spécialité : Instrumentation géophysique

Intitulé :

CONCEPTION D'UN APPAREIL GEOPHYSIQUE POUR LA POLARISATION
PROVOQUEE

Présenté par

ANDRIANIRINA MILISON Tovo Avotra

Devant la commission du jury composée de :

Président : Monsieur RANAIVO-NOMENJANAHARY Flavien Noël

Professeur Titulaire

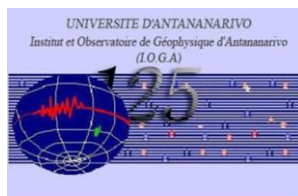
Rapporteur : Monsieur RAMBOLAMANANA Gérard

Professeur Titulaire

Examineur : Monsieur RAKOTO Heritiana A.

Maître de Conférences

Antananarivo, 23 novembre 2016



Laboratoire d'Instrumentation Géophysique et Maintenance



UNIVERSITÉ D'ANTANANARIVO
DOMAINE DES SCIENCES ET TECHNOLOGIES
MENTION PHYSIQUE ET APPLICATIONS



MEMOIRE pour l'obtention du
DIPLÔME DE MASTER EN PHYSIQUE ET APPLICATIONS

Parcours : Physique du Globe

Spécialité : Instrumentation géophysique

CONCEPTION D'UN APPAREIL GEOPHYSIQUE POUR LA POLARISATION
PROVOQUEE



Devant la commission du jury composée de :

Président : Monsieur RANAIVO-NOMENJANAHARY Flavien Noël

Professeur Titulaire

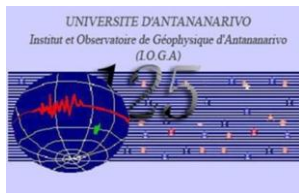
Rapporteur : Monsieur RAMBOLAMANANA Gérard

Professeur Titulaire

Examineur : Monsieur RAKOTO Heritiana A.

Maître de conférences

Antananarivo, 23 novembre 2016



Laboratoire d'Instrumentation Géophysique et Maintenance

Remerciements

Je tiens tout d'abord à rendre grâce à Dieu pour m'avoir donné la santé, la force et le courage afin de mener à terme ce travail.

Ce mémoire n'aurait jamais vu le jour si Monsieur RAHERIMANDIMBY Marson, Professeur titulaire à l'Université d'Antananarivo, Doyen de la Faculté des SCIENCES ne m'a pas permis d'élaborer et de présenter ce mémoire, mes remerciement à Monsieur RAKOTONDRAMIANANA Hery Tiana, professeur à l'Université d'Antananarivo, Chef de département de la Physique, de m'avoir accueilli au sein de son département.

J'adresse mes sincères remerciements à Monsieur RANAIVONOMENJANAHARY Flavien Noel, Professeur Titulaire, responsable de l'équipe d'Accueil Doctoral de la Physique du Globe, de l'Energie et de l'environnement, d'avoir accepté d'être le président du jury de ce mémoire. J'exprime ma plus profonde gratitude envers Monsieur RAMBOLAMANANA Gérard, Professeur Titulaire à la faculté des Sciences de l'Université d'Antananarivo, directeur de l'institut et observatoire de Géophysique d'Antananarivo (IOGA), chef du Laboratoire de Sismologie et infrasons, de m'avoir accueilli parmi ses étudiants en Master II, et d'avoir eu la gentillesse d'être le rapporteur de ce mémoire, pour la qualité de son encadrement, pour ses conseils et remarques pertinents, pour son encouragement et confiance, l'attention qu'il a porté sur ce travail durant ces quelques temps et son soutien sans faille tout au long de ce stage. J'exprime ma reconnaissance à Monsieur RAKOTO Heritiana, Maître de conférences, Enseignant Chercheur et Chef du Laboratoire de Géophysique Appliquée, pour l'intérêt qu'il a porté à l'égard de ce travail et d'avoir accepté de le juger en tant qu'examineur.

Un grand merci particulièrement à Monsieur RAMBOLAMANANA Mamiharijao, Chef du Laboratoire d'instrumentation Géophysique et Maintenance de l'institut et Observatoire de Géophysique d'Antananarivo, pour sa gentillesse de bien vouloir m'accueillir au sein du laboratoire. Je voudrais aussi remercier tous les professeurs, tous les personnels de l'IOGA, mes collègues du LIGM en m'aidant à réaliser ce travail.

Je remercie évidemment ma famille, pour son soutien inconditionnel et l'encouragement aussi bien financière que moral sur la poursuite de mes études.

SOMMAIRE

LISTE DES FIGURES

LISTE des variables

Chapitre I : Généralités

A- Géophysique de subsurface

B- Polarisation provoquée

Définition

Principe de la polarisation provoquée

Dispositif de mesure

Origine de la polarisation provoquée

Mesure de la polarisation provoquée

Chapitre II : MATERIELS ET METHODES

Matériels :

Carte arduino

Convertisseur DC-DC

Convertisseur analogique numérique

Ads1115

Interface graphique

Chapitre III : RESULTATS et INTERPRETATIONS

Chapitre IV : FILTRE NUMERIQUE

Filtre antirepliement

Principe du filtre numérique

Mise en œuvre et implémentation du filtre numérique

Résultats après filtrage

DISCUSSIONS

CONCLUSION

RESUME

LISTE DES FIGURES

fig.1 forme de courant à injecter	10
fig.2 : représentation de la charge de la polarisation provoquée.....	11
fig.3 ; dispositif d'injection du courant dans le sol [7].	12
Fig.4 : schéma électrique de l'effet de la polarisation provoquée	12
fig.5 : allure du potentiel du sol affecte par l'injection du courant.....	14
fig.6 : fenêtre d'analyse temporelle de la décroissance du signal électrique	15
fig.7 : principe de mesure de la chargeabilité apparente	15
fig.8 : rendu de la polarisation provoquée PPT	16
fig 9. Acquisition des données PPT	16
fig.10 schéma synoptique pour réaliser l'équipement	19
Fig11 courbe de décharge	20
fig.12 : Carte Arduino	23
fig.13 : numérisation	25
fig.14 : ADS1115	25
fig.15 : Circuit équivalent de l'entrée analogique de l'ADS1115	27
fig.16 : Organigramme du programme principal de la carte Arduino	29
fig.17 : Organigramme du programme setup de l'Arduino	30
fig.18 : Organigramme de l'attente du choix du temps d'injection	31
fig.19 : Aperçu de l'interface graphique	32
fig.20 : Organigramme du programme principal MATLAB	33
fig.21 : Organigramme d'enregistrement de donnée sur le fichier texte	34
fig.22 : Organigramme pour le traçage de la courbe caractéristique	36
fig.23 : Schéma de montage avec circuit RC	37

fig.24 : Courbe représentant la charge et le décharge du condensateur pour $R = 12\Omega$	38
fig.25 : Courbe représentant la charge et le décharge du condensateur pour $R = 56\Omega$	39
fig.26 : Courbe représentant la charge et le décharge du condensateur pour $R = 100\Omega$	39
fig.27 : Courbe représentant la charge et le décharge du condensateur pour $R = 1\text{ k}\Omega$	40
fig.28 : Mesure sur un sol latéritique*	41
fig.29 : Mesure sur un sol argileux.....	42
fig.30 schéma synoptique de la réalisation avec filtres.....	44
fig.31 filtre actif de 2 nd ordre.....	45
fig.32 chaine de traitement de signal.....	46
fig.33 Filtre NOTCH en combinant les filtres passé bas et passé haut.....	50
fig 34 Réponse d'un filtre rejeteur	50
fig 35 Caractéristique d'un filtre coupe bande.....	51
fig 36 Circuit d'un filtre NOTCH	51
fig.38 : Mesure sur un sol argileux.....	54
fig.39: Mesure sur un sol latéritique*	54

LISTE DES VARIABLES

\vec{J}	Densité de courant	A.m ⁻²
\vec{E}	Champ électrique	V.m ⁻¹
Σ	Conductibilité électrique	S.m ⁻¹
ρ	Résistivité électrique	Ω .m
ρ_a	Résistivité apparente	Ω .m
ρ_{DC}	Résistivité apparente mesurée a basse fréquence entre 0.05H et 0.5Hz	Ω .m
ρ_{AC}	Résistivité apparente mesurée a haute fréquence entre 1HZ et 10Hz	Ω .m
M	Chargeabilité électrique	mV.V ⁻¹
m_a	Chargeabilité apparente	mV.V ⁻¹
r	Distance entre électrode	m
I	Courant électrique	mA
V	Potentiel électrique en un point	V
V_0	Potentiel maximum mesure du a l'injection du courant	V
V_s	Potentiel secondaire observe immédiatement après la coupure du courant	mV
ΔV	Différence de potentiel entre deux électrodes	V
t	Temps d'injection du courant	ms
F	Fréquence	Hz
K	Coefficient géométrique en fonction de la disposition des électrodes	

INTRODUCTION

Face à une demande mondiale des matières premières en constante augmentation, l'Homme doit sans cesse exploiter des gisements de plus en plus complexes et de plus en plus difficiles d'accès. La compréhension de la structure des gisements, de leur mise en place et de leur formation devient alors indispensable, le monde des hommes exige donc des connaissances géologiques intensives.

En effet, la géophysique de subsurface qui constitue un axe de développement pertinent dans la problématique des sols et sous-sols permettra de déterminer la nature des sols. Elle peut fournir des résultats utiles pour aider à la compréhension de la géologie, de l'hydrogéologie de la subsurface (Rubin et Hubbard, 2005), et améliorer la stratégie d'échantillonnage en localisant des anomalies. Plus précisément, la géophysique de subsurface s'intéresse aux propriétés électriques des sols et roches car, comme par exemple la densité ou la susceptibilité magnétique, elles permettent de caractériser et d'imaginer le sous-sol. Les propriétés électriques peuvent être mesurées de plusieurs façons. Les trois propriétés fondamentales sont :

- 1-l'activité électrochimique : base de la polarisation spontanée
- 2-la résistivité : facilité avec laquelle on peut faire passer un courant électrique dans la roche
- 3-la constante diélectrique : capacité des roches à emmagasiner de l'énergie et à la restituer ; base de la polarisation provoquée [1].

En ce qui concerne la polarisation provoquée, également appelée chargeabilité électrique, ses domaines d'application s'étendent à la détection des hydrocarbures, la prospection pétrolière et à des applications environnementales ainsi que l'hydrogéologie [2], plus particulièrement elle est adaptée à la prospection minière. Cette méthode consiste à mesurer le retard de la réponse d'un milieu soumis à un champ électrique externe. Ce retard est lié à un temps non nul nécessaire pour qu'un milieu revienne à l'équilibre lorsque le courant injecté est coupé [w1].

L'objectif de ce travail c'est de concevoir et de réaliser un appareil permettant de mesurer la polarisation provoquée.

Le présent travail contient les chapitres suivants : le premier chapitre expose le principe et la définition de la polarisation provoquée. On va voir dans le second chapitre les méthodes pour la conception de l'appareil. Le troisième décrit l'interface matérielle, avec application du

microcontrôleur dans le filtrage numérique. Enfin, au dernier chapitre, on va présenter les résultats et les discussions.

Chapitre I : Généralités

A. Géophysique de subsurface

La géophysique de subsurface est appliquée dans l'exploration du sous-sol et s'intéresse aux premiers mètres du sol. Elle peut fournir des résultats sous formes de coupes, de cartes, utiles notamment pour la compréhension de la géologie, de l'hydrogéologie de la subsurface (Rubin et Hubbard, 2005), et améliorer la stratégie d'échantillonnage en localisant des anomalies.

Les méthodes géophysiques, et plus spécifiquement géoélectriques, à savoir les méthodes de résistivité électrique, d'électromagnétisme en champ proche à faible nombre d'induction, de polarisation provoquée temporelle et spectrale et de géoradar ont été employées dans le cadre de la prospection souterraine.

Les paramètres utilisés pour caractériser les propriétés physiques d'un milieu sont nombreux : résistivité/conductivité électrique, permittivité diélectrique, perméabilité magnétique, densité, vitesse des ondes sismiques entre autres.

Résistivité et conductivité électrique

La résistivité définit la capacité d'un matériau à laisser les charges électriques se déplacer librement, c'est-à-dire à conduire un courant électrique. La résistance électrique R est définie par la loi d'Ohm en mesurant la différence de potentiel induite entre deux points d'un matériau par la circulation électrique d'intensité I entre ces deux points: résistivité électrique (Ohm) : $R = \frac{\Delta V}{I}$
la conductivité est l'inverse de la résistivité.

Distribution du potentiel électrique dans le sol :

Soit une source ponctuelle P émettant un courant I et créant un potentiel V en un point $M(x, y, z)$. Ce potentiel V obéit à l'équation de Laplace suivant :

$$\nabla^2 V = 0 \quad (2)$$

$$\frac{\partial^2 V}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 V}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 V}{\partial z^2} = 0 \quad (3)$$

Puisque le système est symétrique, le potentiel n'est en fonction que de r qui est la distance à l'électrode. On a alors :

$$\nabla^2 V = \frac{d^2 V}{dr^2} + \frac{2}{r} \frac{dV}{dr} = 0 \quad (4)$$

$$\frac{d^2 V}{dr^2} = -\frac{2}{r} \frac{dV}{dr} \quad (5)$$

Posons $u = \frac{dV}{dr}$, alors :

$$\frac{du}{dr} = -\frac{2}{r} u \quad (6)$$

$$\frac{du}{u} = -2 \frac{dr}{r} \quad (7)$$

Après intégration, on a :

$$\ln(u) = -2\ln(r) + \ln(A) \quad (8)$$

On peut écrire que :

$$\ln(u) = \ln\left(\frac{A}{r^2}\right) \quad (9)$$

Et

$$e^{\ln(u)} = e^{\ln\left(\frac{A}{r^2}\right)} \quad (10)$$

D'où

$$u = \frac{A}{r^2} \quad (11)$$

$$\frac{dV}{dr} = \frac{A}{r^2} \quad (12)$$

Par intégration nous obtenons :

$$\int dV = \int \frac{A}{r^2} dr \quad (13)$$

$$V = \frac{-A}{r} + B \quad (14)$$

A et B sont des constantes d'intégration

Puisque V est nul si r tend vers l'infini, alors B est égal à zéro. Pour trouver A, on utilise la relation par la loi d'Ohm. Or le courant suit un champ radial provenant de l'électrode. Comme le courant traverse une surface demi-sphérique ($2\pi r^2$) on a :

$$I = 2\pi r^2 \cdot \vec{J} \quad (15)$$

\vec{J} étant la densité de courant

Or on a aussi $\vec{J} = \sigma \vec{E}$

$$\text{Avec } \vec{E} = -\nabla V = \frac{-dV}{dr} = \frac{-A}{r^2} \quad (16)$$

\vec{E} : Champ électrique

On a alors :

$$\vec{J} = \frac{-\sigma A}{r^2} \quad (17)$$

$$I = 2\pi r^2 \cdot \left(\frac{-\sigma A}{r^2} \right) \quad (18)$$

$$A = \frac{-I\rho}{2\pi} \quad (19)$$

On obtient au final :

$$V = \frac{I\rho}{2\pi r} \quad (20)$$

Distribution du potentiel électrique sur un dispositif ABMN :

On injecte un courant I aux électrodes A et B. Lorsque la distance entre les électrodes est finie, on observe que sur le potentiel au point M, on a le potentiel affecté par l'électrode A suivant la relation suivante [5] :

$$V_{am} = \frac{I\rho}{2\pi AM} \quad (21)$$

Si V_{am} : Potentiel au point M dû à l'électrode au point A

I : Intensité de courant injecté par AB

ρ : Résistivité du matériau

AM : Distance entre les points A et M

Le potentiel affecté par l'électrode B est :

$$V_{bm} = \frac{-I\rho}{2\pi BM} \quad (22)$$

Si V_{bm} : Potentiel au point M dû à l'électrode au point B

I : Intensité de courant injecté par AB

ρ : Résistivité du matériau

BM : Distance entre les points B et M

Comme le courant qui sort par une électrode est le même que celui qui entre par l'autre, on a

$$I_1 = -I_2.$$

On a alors le potentiel au point M comme suit :

$$V_{am} + V_{bm} = \frac{I\rho}{2\pi} \left(\frac{1}{AM} - \frac{1}{BM} \right) \quad (23)$$

Par la même procédure appliquée au point N, on a :

$$V_{an} + V_{bn} = \frac{I\rho}{2\pi} \left(\frac{1}{AN} - \frac{1}{BN} \right) \quad (24)$$

Si V_{an} : Potentiel au point N dû à l'électrode au point A

V_{bn} : Potentiel au point N dû à l'électrode au point B

AN : Distance entre les points A et N

BN : Distance entre les points B et N

Ainsi la différence de potentiel entre les deux électrodes est :

$$\Delta V = (V_{am} + V_{bm}) - (V_{an} + V_{bn}) \quad (25)$$

D'où :

$$\Delta V = \frac{I}{2\pi} \left[\left(\frac{1}{AM} - \frac{1}{AN} \right) - \left(\frac{1}{BM} - \frac{1}{BN} \right) \right] \quad (26)$$

Si ΔV : Différence de potentiel entre M et N

Ainsi on peut en déduire la résistivité apparente des matériaux par la formule suivante :

$$\rho a = K \cdot \frac{\Delta V}{I} \quad (27)$$

ρa : résistivité apparente en Ωm ,

ΔV : Différence de potentiel en mV,

I : courant injecté en mA,

K : coefficient géométrique en fonction de la disposition des électrodes tels que :

$$K = \frac{2\pi}{\left(\frac{1}{AM} - \frac{1}{AN}\right) - \left(\frac{1}{BM} - \frac{1}{BN}\right)}$$

Ainsi si AB augmente, les lignes de courant atteignent des couches de plus en plus profondes.

Nous remarquons que :

- S'il n'existe pas de réel contraste de résistivité entre les formations, la méthode est inutile.
- Il faut que le courant électrique atteigne les objets à étudier en profondeur et que les anomalies dues aux hétérogénéités du sous-sol soient mesurables.

B. Polarisation provoquée :

Définition :

La polarisation provoquée est une méthode géophysique, principalement elle est utilisée pour l'exploration minérale depuis les années 1950. La polarisation provoquée peut être utile pour l'exploration des ressources comme le pétrole [4], on peut caractériser et faire la cartographie hydrologique avec cette méthode. Elle est praticable et fonctionnelle aussi bien en laboratoire que sur le terrain.

Les courants traversant le sol peuvent provoquer une polarisation de certains constituants du sol. Le processus est similaire à la charge d'un condensateur ou d'une batterie où les effets capacitifs et électrochimiques sont impliqués. C'est un phénomène de charge puis décharge. Elle est appelée chargeabilité électrique. Ce phénomène est une fonction des propriétés capacitatives de la roche:

Principe de la polarisation provoquée :

A l'aide des électrodes d'injection, le courant I est injecté dans le sol, ce courant induit une différence de potentiel ΔV dans le sol, ensuite, après coupure de courant, cette dernière est mesurée par une autre paire d'électrodes de potentiels.

Le courant injecté ici est alternatif ou en crêteaux, Cette méthode fait intervenir à la fois le paramètre de conductivité mais également de permittivité diélectrique qui définit la facilité d'un matériau à se charger électriquement.

Toutefois, le potentiel mesuré en surface ne s'établit pas instantanément et, d'une façon similaire, lorsque le courant est coupé, le potentiel ne chute pas instantanément à zéro. Il existe un délai ou un retard entre l'instant où le voltage atteint son maximum et celui correspondant à un retour à l'équilibre i.e., $V=0$. Ce retard est dû soit aux instruments de mesure soit à un effet du sous-sol.

En général, le retard de nature instrumentale est corrigé. Après la coupure du courant, un retour progressif du milieu à l'état d'équilibre se fait et un faible potentiel résiduel transitoire associé à cet effet capacitif peut être mis en évidence. Le temps de retour à l'équilibre est aussi appelé temps de relaxation.

Elle, c'est-à-dire la méthode de PP, consiste à mesurer le retard de la réponse d'un milieu soumis à un champ électrique externe.

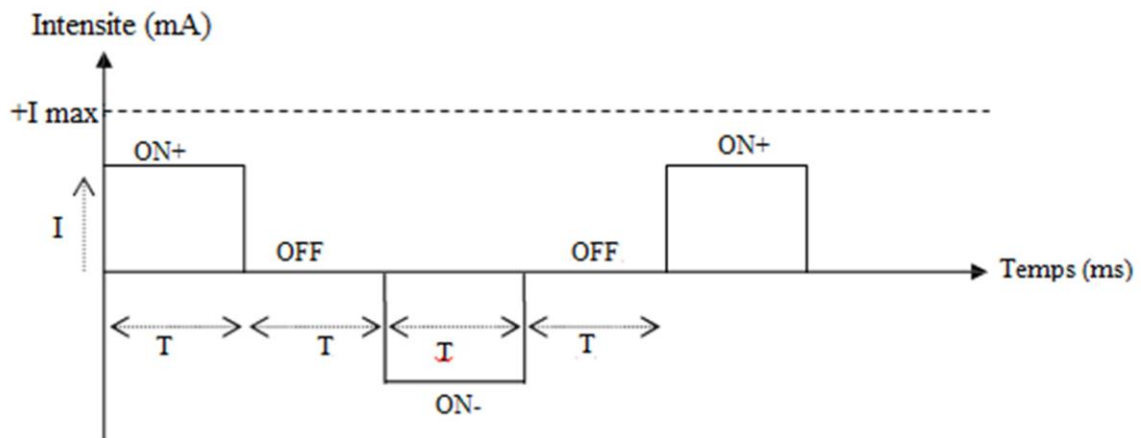


fig.1 forme de courant à injecter

En utilisant un dispositif d'électrodes classiques ABMN, on injecte au sol la forme du courant décrit précédemment par l'intermédiaire de A et B. Lorsqu'on coupe l'injection, on constate entre M et N une différence de potentiel qui, au lieu de tomber immédiatement à zéro, se diminue progressivement pour être égal à zéro au bout d'un intervalle de temps t déterminé. Ce potentiel résiduel est appelé polarisation provoquée [6].

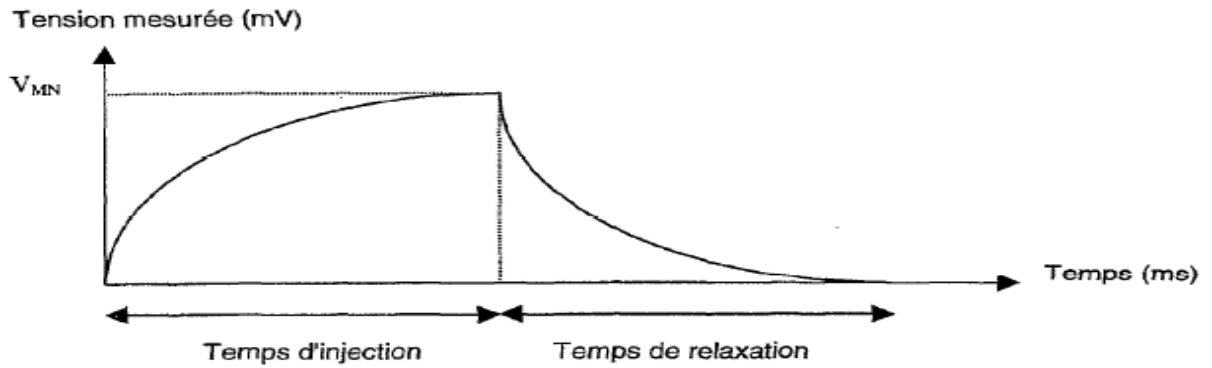


fig.2 : représentation de la charge de la polarisation provoquée

Dispositif de mesure :

Les méthodes de résistivité électrique consistent à faire circuler un courant électrique dans le sol entre deux électrodes de courant et de mesurer la différence de potentiel induite entre deux autres électrodes, appelées électrodes de potentiel. Puisque l'intensité du courant est connue et que la différence de potentiel est mesurée, il est alors possible de déterminer quelle est la résistivité apparente du sol étudié. Cette résistivité électrique apparente dépend de la configuration des électrodes de courant et de potentiel. La résistivité apparente ρ_a peut être exprimée en fonction de la différence de potentiel et de l'intensité du courant :

$$\rho_a = k \frac{\Delta V}{I}$$

Où k est appelé le facteur géométrique qui dépend de la configuration des électrodes.

La structure du sous-sol peut-être caractérisée par l'étude des résistivités électriques des éléments présents dans le sol. On peut représenter la méthode de la polarisation provoquée et de l'allure des filets de courant qui relient les électrodes placées à la surface du sol par la figure 3.

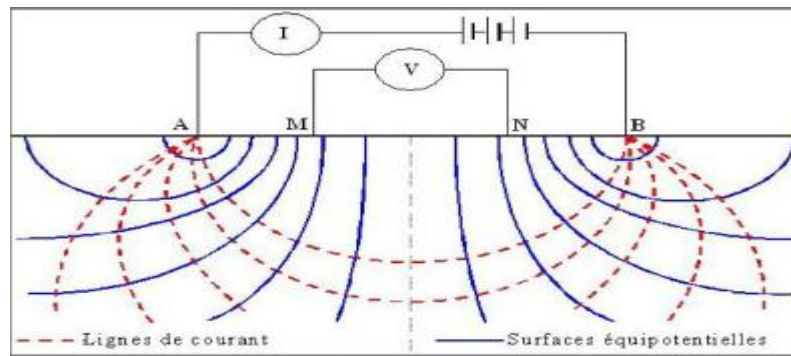
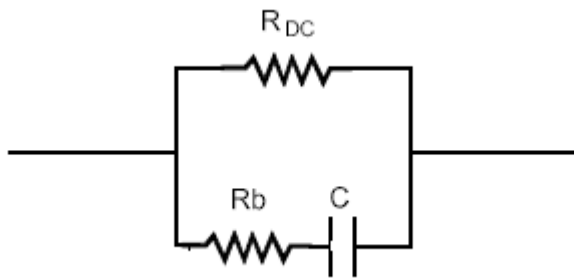


fig.3 ; dispositif d'injection du courant dans le sol [7].

Circuit électrique équivalent :

La réponse électrique du sous-sol peut en première approximation être considérée comme

un analogue d'un circuit électrique [7].



R_{DC} : Résistance due à la conduction ionique dans les pores non bouchés

R_b : Résistance due à la conduction ionique dans les pores bouchés

C : capacitance représentant la charge qui s'installe sur les particules métalliques lorsque le courant est injecté.

Fig.4 : schéma électrique de l'effet de la polarisation provoquée

A basse fréquence, la capacitance agit comme un circuit ouvert et on mesure R_{DC} seulement a plus haute fréquence, la capacitance approche le court-circuit et le calcul de R dépend de R_b et R_{DC} .

Origine de la polarisation provoquée :

a~ Polarisation d'électrode :

Le passage du courant se fait de deux façons [8] :

- **Conductibilité électrique** : déplacement d'électrons libres dans les particules métalliques (pyrite, chalcopryite,...),
- **Conductibilité ionique** : déplacement d'ions dans les solutions contenues dans les pores et les fractures des roches.

Le passage du courant électrique dans le sol s'accompagne de processus électrochimiques dont le caractère et l'intensité dépendent directement des propriétés physiques et chimiques du sol et se fait par conduction ionique à travers des pores ou fractures remplis de solutions. Mais, des fois, ces pores peuvent être bouchés par des particules métalliques comme les minerais. Comme ces particules ne peuvent plus transmettre d'ions, il y a donc accumulation d'ions à la surface de la particule. Alors, les particules sont chargées et ces charges attirent ou repoussent des électrons dans la particule métallique et la particule est polarisée. Si on coupe brusquement le courant, cette particule se décharge comme un condensateur moléculaire.

L'effet PP dépend ainsi du nombre de pores bloqués. La polarisation provoquée ne dépend pas seulement du volume du minerai mais aussi de son état de dissémination.

b~ Polarisation de membrane :

La plupart des minéraux possèdent une charge négative à leur surface de séparation avec le liquide poral [9]. On constate que les cations sont attirés par cette surface et que les anions sont repoussés. Cette attraction est due pour maintenir l'équilibre électrique et on obtient une double couche électrique. Lors du passage du courant, l'équilibre de la double couche est rompu et une nouvelle forme d'équilibre s'établit au bout d'un certain moment. Et après l'interruption de l'excitation en courant, les charges se redistribuent pour retrouver leur équilibre initial dans un temps déterminé. C'est cet intervalle de temps où les charges retrouvent leur équilibre initial qui définit l'effet PP.

Ce phénomène est plus important en présence de particules argileuses pour lesquelles la taille des pores est particulièrement petite.

Mesures de la polarisation provoquée :

La polarisation provoquée peut être mesurée comme le changement de tension avec le temps ou la fréquence. La méthode PP de temps ou de fréquence est sensiblement la même mais elle diffère dans la manière de considérer et de mesurer les formes d'onde électrique. Dans le domaine temporel, un courant continu est injecté dans le sol et on mesure la décharge progressive du potentiel entre les deux électrodes juste après la coupure du courant. Dans le domaine fréquentiel, on détermine la variation de la résistivité apparente du sol en fonction de la fréquence du courant appliquée.

a) Mesure dans le domaine temporel :

Le courant injecté dans le sol est sous forme de créneaux c'est-à-dire qu'on décompose ce courant généralement en 4 temps égaux sous la forme **+ON, OFF, -ON, OFF**.

Notons V_0 le potentiel maximum du sol mesuré dû à l'injection du courant et à l'effet de polarisation (région ON), V_s est le potentiel secondaire observé immédiatement après la coupure du courant (région OFF) et V est le potentiel qui serait mesuré en l'absence de la chargeabilité. Ce potentiel rapporterait la résistivité du sol [10].

On parle de Polarisation Provoquée Temporelle (PPT)

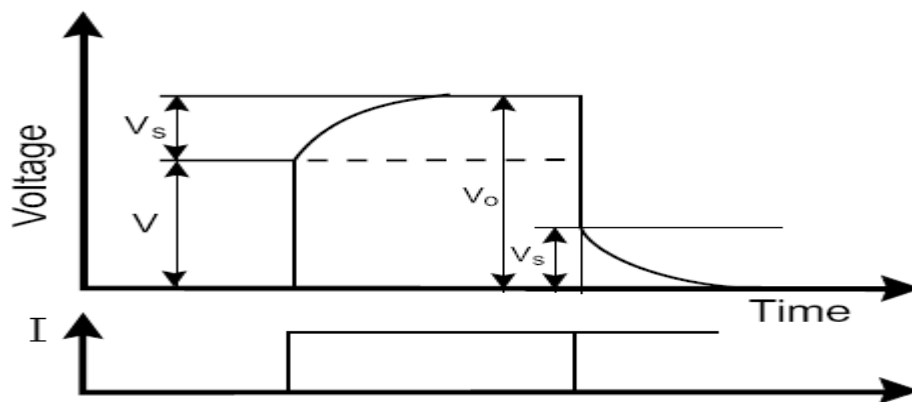


fig.5 : allure du potentiel du sol affecte par l'injection du courant

En pratique, un délai avant la mesure de la courbe de décharge est nécessaire pour s'assurer qu'il n'y ait pas d'effets transitoires comme les réponses électromagnétiques.

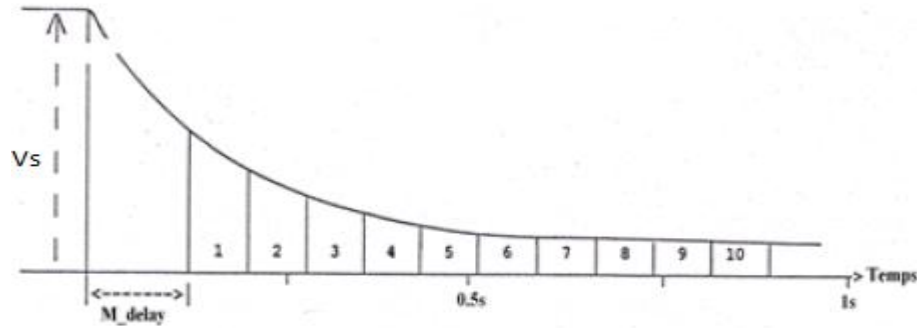


fig.6 : fenêtre d'analyse temporelle de la décroissance du signal électrique

Le rapport entre V_s et V_o mesure la chargeabilité électrique. Mais la vraie chargeabilité ne peut être mesurée dans un milieu hétérogène. Donc ce que l'on mesure vraiment est la chargeabilité apparente m_a qui est une fonction des vraies chargeabilités et résistivités des matériaux sondés. La figure 7 présente le principe de mesure de la chargeabilité apparente.

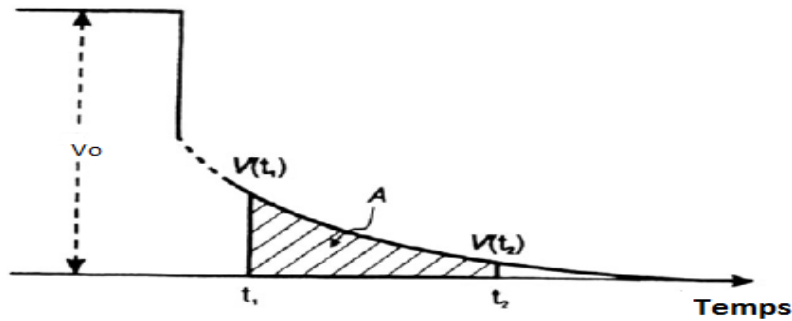


fig.7 : principe de mesure de la chargeabilité apparente

Quant à la chargeabilité apparente m_a , elle est donnée par :

$$m_a = \frac{1}{V_o} \int_{t_1}^{t_2} V_s(t) dt \quad (28)$$

m_a : La chargeabilité apparente

V_o : Différence de potentiel maximale observé avant la coupure du courant

$V_s(t)$: Différence de potentiel décroissante en fonction du temps observé après la coupure du courant.

On exprime la chargeabilité apparente en mV/V. La figure8 donne le rendu final de la polarisation provoquée [11].

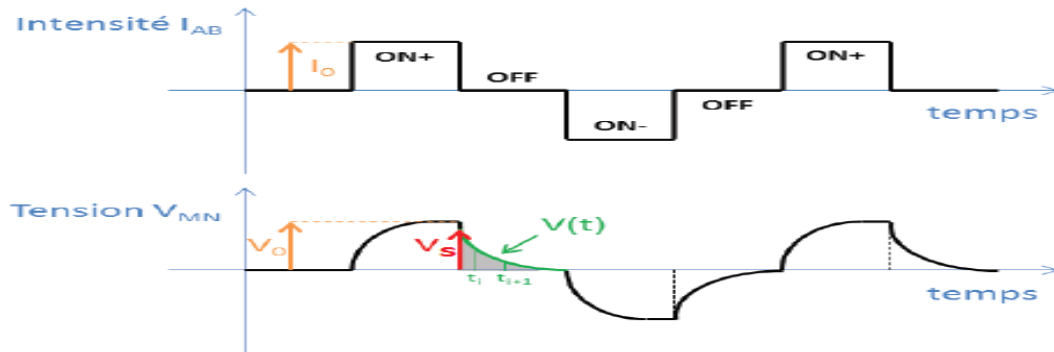


fig.8 : rendu de la polarisation provoquée PPT

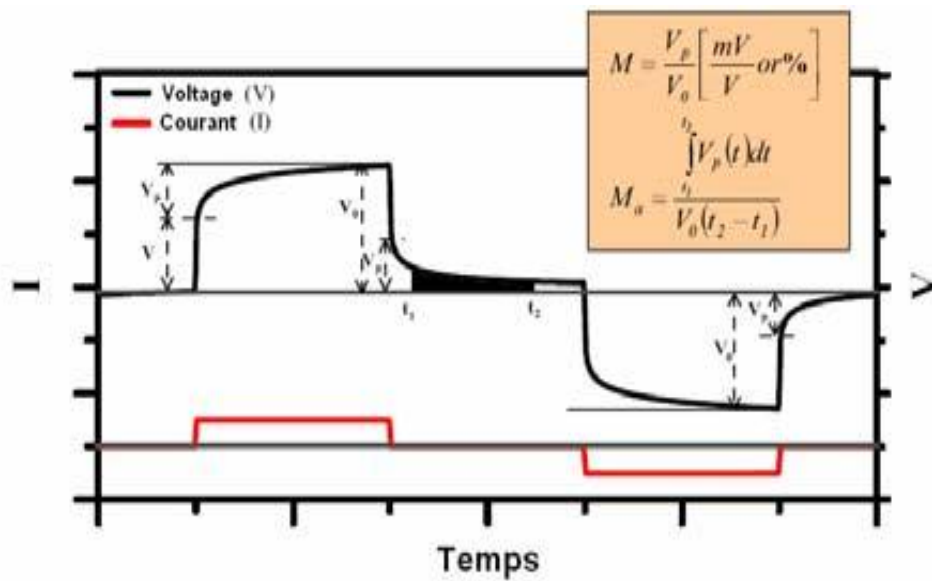


fig 9. Acquisition des données PPT

b) Mesure dans le domaine fréquentiel :

On parle de Polarisation Provoquée Spectrale (PPS)

Le fait que la résistivité apparente change avec la fréquence du courant appliqué, lorsque la fréquence augmente, le potentiel V_s n'a pas le temps d'atteindre son maximum lorsque le est toujours tourne en position de marche alors

Dans le domaine fréquentiel, on injecte un courant alternatif de fréquence variable. En laboratoire ce dernier est, en général, en bande large allant de 1mHz à 50kHz. Sur terrain, la fréquence est souvent limitée à 100Hz. Au-delà de cette fréquence, on obtient des effets d'induction électromagnétique qui domine l'effet PP.

L'intérêt de la mesure dans le domaine fréquentiel est que la résistivité apparente change avec la fréquence du courant appliqué. Lorsqu'on augmente la fréquence, V_s n'a pas le temps d'atteindre son maximum lorsque le courant est tourné à ON d'où V_o et p_a sont faibles. La résistivité mesurée à haute fréquence est alors celle où il n'y a pas d'effet PP.

Inversement à basse fréquence, V_s peut atteindre son maximum et V_o et p_a sont plus élevées.

Pour exploiter ces propriétés, on définit l'Effet de Fréquence (EF) défini par [12]:

$$EF = \frac{\rho_{DC} - \rho_{AC}}{\rho_{AC}} \quad (29)$$

En désignant par :

ρ_{DC} : résistivité apparente mesurée à basse fréquence comprise entre 0.05Hz et 0.5Hz,

ρ_{AC} : résistivité apparente mesurée à haute fréquence comprise entre 1 à 10Hz.

Le facteur métal est une mesure où l'on tente de corriger l'effet, sur la polarisation provoquée, de la variation de la résistivité d'un milieu à un autre et l'on a [12] :

$$EF = \frac{\rho_{DC} - \rho_{AC}}{\rho_{DC} \cdot \rho_{AC}} \quad (30)$$

Le déphasage est la différence de phase entre le voltage entre MN et le courant injecté dans le sol. Ce déphasage est généralement de quelques centièmes ou dixièmes de radians à une fréquence de l'ordre d'environ un hertz. Le déphasage s'exprime en milliradians.

c) Relation entre domaine temporel et domaine fréquentiel :

Comme ces deux domaines mesurent le même phénomène alors on doit avoir théoriquement les mêmes résultats. Mathématiquement, le domaine fréquentiel est la transformée de Fourier du domaine temporel [12].

Chapitre II : MATERIELS ET METHODES

L'objectif de notre étude est de créer un équipement permettant de mesurer le phénomène de la polarisation provoquée dans le domaine temporel.

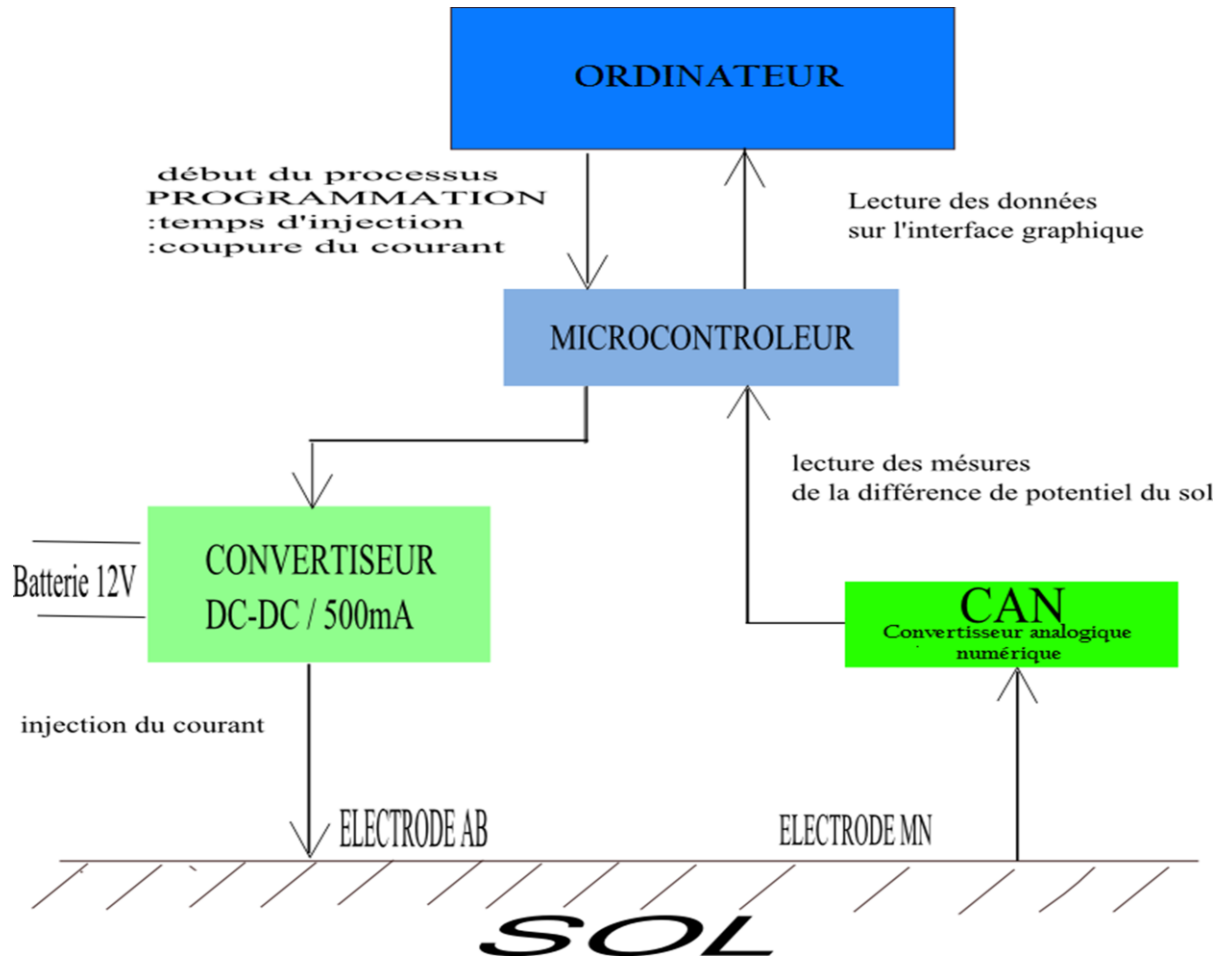
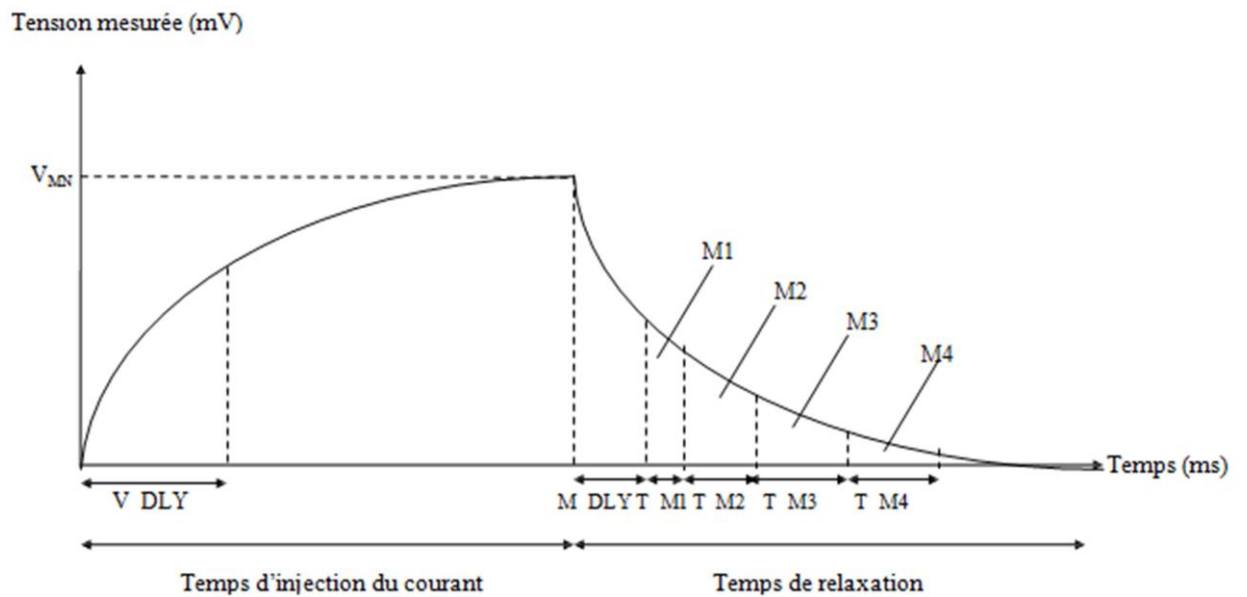


fig.10 schéma synoptique pour réaliser l'équipement

Voici les paramètres à mettre en compte pour réaliser l'appareil :

- Le courant électrique à injecter,
- La différence de potentiel juste avant la coupure du courant,
- La durée d'injection,
- La distance entre les électrodes,
- La différence de potentiel aux instants (qu'on va voir à la suite) lors du moment de décharge.



On peut choisir le temps d'injection du courant (ms), soit 500 ou 1000, soit 2000.

Durée d'impulsion	TIME	500	1000	2000
Délai avant la mesure du premier échantillon de V	V_DLY	240	580	1260
Délai avant la mesure du premier échantillon de M	M_DLY	160	160	160
Longueur de la fenêtre 1	T_M1	80	120	120
Longueur de la fenêtre 2	T_M2	180	220	220
Longueur de la fenêtre 3	T_M3		420	420
Longueur de la fenêtre 4	T_M4			820

La formule suivante donne la moyenne pondérée (M) des valeurs moyennées des chargeabilités partielles (Mi):

$$M = 120 * M1 + 220 * M2 + 420 * M3 + 820 * M4 / (120 + 220 + 420 + 820)$$

Le phénomène de la polarisation provoquée exige une grande précision. Le temps d'injection doit être assez longue pour que les effets de couplages électromagnétiques dans le sol soient négligeables et assez courtes pour que la différence de potentiel ne soit pas trop faible pour être mesurable. En effet, on a choisi 2000ms comme temps d'injection, et d'avoir 4 fenêtres PP, qui nous permet d'avoir la chargeabilité globale du sous-sol [20].

- Il est aussi indispensable d'éliminer, autant que possible, toutes sortes de perturbation pouvant fausser les données mesurées telles que les couplages capacitifs et les couplages électromagnétiques.
- Il est aussi nécessaire que le courant à injecter soit suffisant pour provoquer la polarisation du sol.

En général, on utilise un courant électrique supérieur ou égal à 500mA. Étant donné que la donnée à mesurer est la différence de potentiel aux bornes des électrodes pendant le temps de décharge et qu'elle est assez faible de l'ordre de millivolts, il est nécessaire d'utiliser un Convertisseur Analogique Numérique (CAN) dont l'échantillonnage est le plus élevé possible avec une vitesse de conversion rapide afin de récolter le plus de

données possible pour avoir une courbe de décharge sensiblement linéaire et d'avoir une précision sur la prospection.

L'appareil de mesure de la polarisation provoquée fonctionne comme suit : les électrodes A et B seront connecté à un convertisseur DC-DC qui lui injectera le courant continue pour la polarisation du sol. L'injection et la coupure de courant sera contrôlée par un microcontrôleur. De l'autre côté, les électrodes M et N seront connectés à un convertisseur analogique numérique qui lui à son tour transfèrera les données reçus vers le même microcontrôleur. Ce microcontrôleur sert donc d'interface entre l'utilisateur et notre équipement sur le choix du temps d'injection de courant et de la lecture des résultats obtenus.

Microcontrôleur :

Un microcontrôleur est une unité de calcul doté de mémoire possédant des ports d'entrée et sortie permettant d'interagir avec son environnement. Dans le présent projet, le choix s'est porté sur la carte Arduino. Vue sa caractéristique, il répond amplement à nos attentes sur sa vitesse de traitement d'instruction et sa capacité de communiquer avec d'autres modules par le bus I2C. Avec un environnement de programmation gratuit, la carte Arduino est plus facile à programmer. De même la carte Arduino possède un convertisseur analogique numérique de quantification 10 bits [13] mais par rapport à notre objectif, cette quantification n'est pas suffisante, d'où l'utilisation de l'ADS1115.

Carte Arduino :

La carte Arduino possède plusieurs modèles dans le marché mais on utilise la première version nommée Arduino UNO qui est la version la plus stable. Ce dernier fonctionne avec un microcontrôleur ATmega 328P cadencé à 16MHz et possède 32ko de mémoire flash destinée à recevoir le programme et 2ko de mémoire vive SRAM et 1ko de mémoire morte destinée aux données EEPROM. Elle possède plusieurs broches d'entrées et sorties pouvant, chacune, délivrer un courant de 40mA pour une tension de 5V [13].

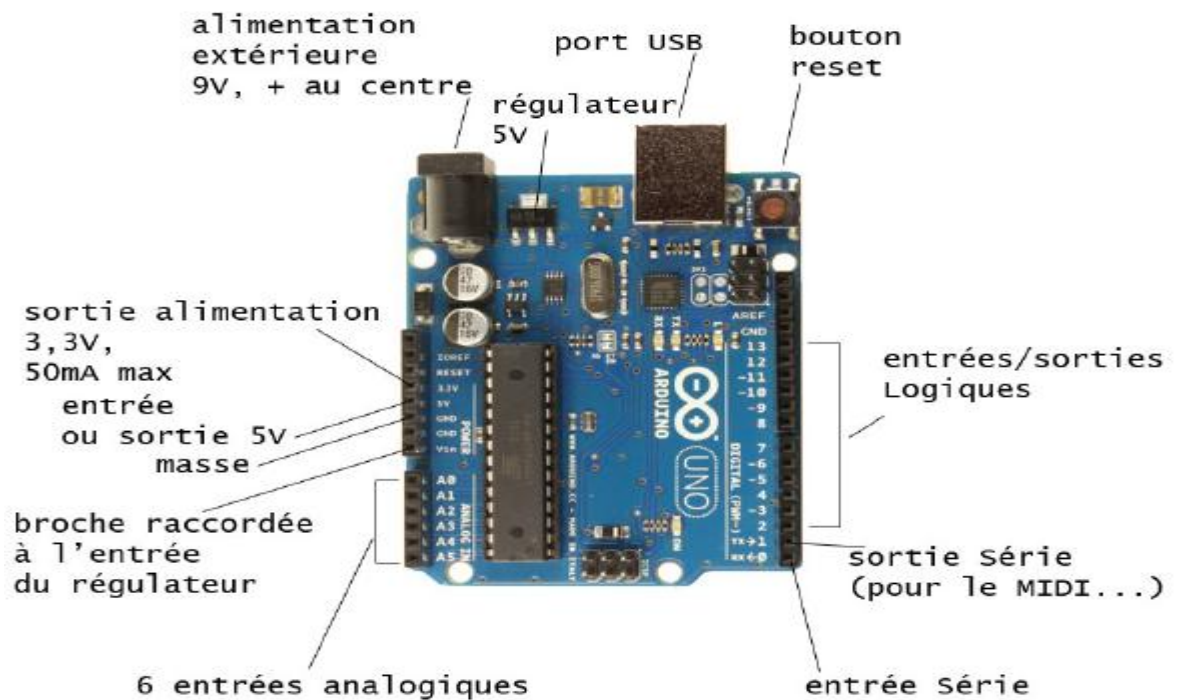


fig.12 : Carte Arduino

Convertisseur DC-DC :

Notre équipement sert à être utilisé sur terrain et il faudra fournir une énergie suffisante pour la polarisation. Par conséquent, l'utilisation d'un hacheur appelé aussi convertisseur statique continu-continu est une solution qui permet ainsi de fournir une source de tension continue variable à partir d'une source de tension continue fixe. On part du principe qu'à partir d'une tension de batterie 12V, nous pouvons délivrer l'énergie nécessaire pour provoquer la polarisation du sol. Étant donné que le phénomène de la polarisation provoquée n'est pas défini par une source de tension ou de courant précis, d'où il est préférable de concevoir un hacheur pouvant délivrer plusieurs valeurs de tension continue nous permettant ainsi d'avoir plus de précision sur l'acquisition de données pour la polarisation provoquée.

Convertisseur analogique numérique (CAN)

Un convertisseur analogique numérique (CAN) est un dispositif électronique qui transforme une grandeur analogique en un nombre binaire [w1].

Dans notre projet, nous avons besoin d'un CAN avec une fréquence d'échantillonnage élevée et dont la quantification est grande pour que l'amplitude du signal numérique soit plus proche de celle du signal analogique.

Les signaux naturels sont de type analogique, qui peut prendre une infinité de valeurs.. Il faut convertir ces signaux en digital ou suite de nombres codes sous forme bilinéaire, autrement dit un signal numérique est un signal discret qui se résume en une succession de « 0 » et de « 1 » (un PC ne save pas travailler avec l'analogique, il ne lit que le binaire). Par conséquent, on a alors un signal numérique, qui ne prend que des valeurs bien définies, en nombre limité. [14]

Un CAN transforme une tension analogique en une valeur numérique : c'est la numérisation. Un CAN nécessite souvent la présence d'un échantillonneur-bloqueur en entrée

Le CAN intégré dans le microcontrôleur, possède plusieurs entrées multiplexées et possède deux groupes registres de configuration :

- i) des registres de données contenant le résultat de la conversion,
- ii) des registres de contrôle permettant de lancer et de surveiller la conversion.

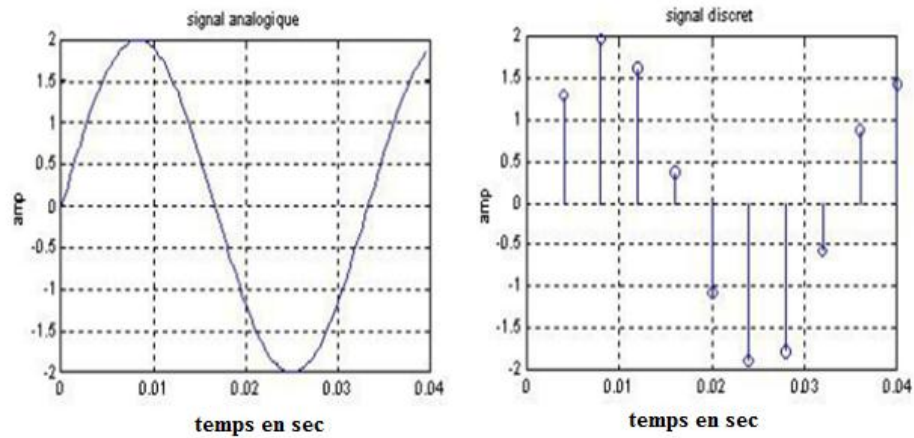


fig.13 numérisation

ADS1115 :

L'ADS1115 est un convertisseur analogique numérique avec une quantification de 16 bits et dont sa capacité de traitement est de 8 à 860 échantillons par seconde. Elle peut être alimentée soit avec une tension de 2V ou 5,5V avec une faible consommation à un minimum de 150uA. Elle est régie sur un bus I2C et possède 4 canaux en mode asymétrique et 2 canaux en mode différentiel. 'ADS1115 possède aussi un amplificateur de gain programmable (PGA) permettant de sélectionner 7 gammes de tension d'entrée [w2].

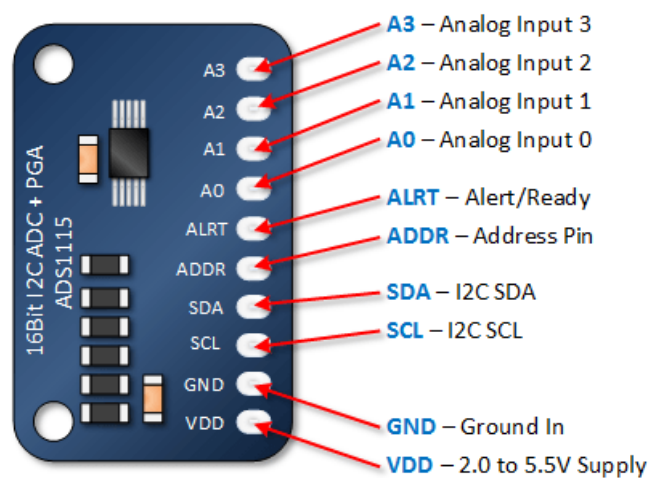


fig.14 : ADS1115

- Bus I2C:

L'I2C ou *Inter-Integrated Circuit* est un bus de données série synchrone bidirectionnel *half-duplex*. Les échanges ont toujours lieu entre un seul maître et un ou plusieurs esclaves. La connexion peut être réalisée par l'intermédiaire de 2 lignes :

- *Serial Data Line*(SDA) : ligne de donnée bidirectionnelle.
- *Serial Clock Line*(SCL) : ligne d'horloge de synchronisation bidirectionnelle.

L'I2C possède une masse commune et le nombre maximal d'équipements est limité par le nombre d'adresses disponibles. Les bits de données sont codés de type NRZ. Le niveau HAUT ou BAS de la ligne SDA doit être maintenu stable pendant le niveau HAUT sur la ligne SCL pour la lecture du bit [w3].

- Amplificateur de gain programmable:

Avant de passer à la conversion, les données doivent passer par un amplificateur. Cet amplificateur permet de mesurer de petites tensions avec une résolution accrue. Le tableau 1 montre la configuration du PGA correspondant à la gamme de tension d'entrée [w4].

<u>Configuration PGA</u>	<u>Gamme de tension d'entrée</u>
2/3	$\pm 6,144V$
1	$\pm 4.096V$
2	$\pm 2.048V$
4	$\pm 1.024V$
8	$\pm 0.512V$
16	$\pm 0.256v$

Tableau : Configuration du gain PGA.

- Mode de calcul de l'ADS1115 :

Comme l'ADS1115 est à nombre entier signé, il est important de savoir que seul les 15 bits sont utilisés pour communiquer les valeurs acquises et le 1^{er} bit pour dire si on a une valeur positive ou négative. Donc pour 15 bits, on a 32768 valeurs possibles.

En prenant la valeur pour la configuration par défaut, les 32768 valeurs possibles représentent 6,144V. D'où on obtient 0.1875mV par bit [w2].

Dans l'exemple où la mesure retourne la valeur 500, on obtient :

$$\frac{500 * 6.144}{32768} = 0,09375V$$

Où $500 \times 0,1875 = 93,75mV$.

A-6-b~ Fiabilité de l'ADS1115 :

- ❖ Impédance d'entrée :

Voici un schéma équivalent de l'entrée analogique de l'ADS1115:

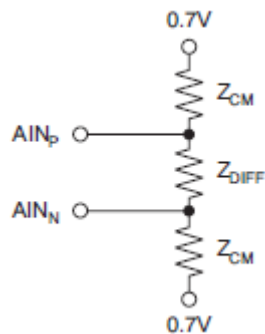


fig.15 : Circuit équivalent de l'entrée analogique de l'ADS1115

L'impédance d'entrée en mode commun est mesurée en appliquant un signal aux entrées court-circuitées d' A_{IN_P} et d' A_{IN_N} et en mesurant le courant moyen consommé par chaque broche.

L'impédance d'entrée de l'ADS1115 dépend de la configuration du PGA. Elle est environ $6M\Omega$ pour le gain par défaut du PGA. L'impédance d'entrée différentielle est mesurée en appliquant un signal différentiel aux entrées d' A_{IN_P} et d' A_{IN_N} où une entrée est tenue à 0,7V.

L'ADS1115 est précis et très sensible répondant ainsi à notre attente.

Organigramme du programme de réception de données :

L'Arduino commandera le temps d'injection du courant dans le sol. c'est l'Arduino qui commandera la marche et la coupure d'injection de courant. C'est aussi à l'Arduino d'envoyer les données lues vers l'ordinateur pour être exploitées par l'utilisateur.

Notre programme se déroulera comme suit : au démarrage de l'Arduino, on mesure la différence de potentiel du sol sans aucune injection. Ensuite l'utilisateur choisit le temps d'injection du courant et l'Arduino active le convertisseur et ce dernier charge le sol jusqu'à ce que le temps d'injection soit atteint. Et enfin l'Arduino mesurera la différence de potentiel du sol pendant son décharge tout en envoyant ceci vers la communication série jusqu'à ce que ce potentiel atteint la différence de potentiel mesuré au début de notre programme.

L'Arduino peut communiquer avec l'ADS1115 par le bus I2C. D'ailleurs, une bibliothèque permettant de configurer le module ADS1115 est disponible sur le site du fournisseur, Adafruit, ceci nous facilitera l'établissement de la connexion entre les deux équipements et la configuration de notre CAN.

Voici l'organigramme de la totalité du programme que l'on chargera dans la carte Arduino.

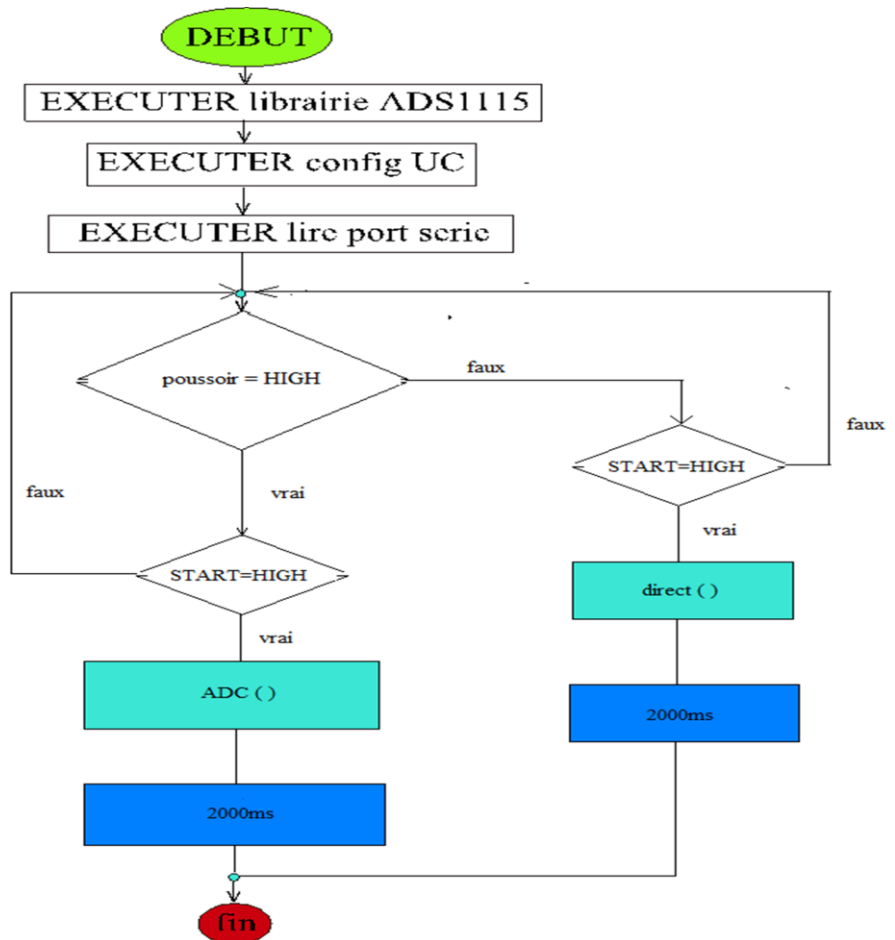


fig.16 : Organigramme du programme principal de la carte Arduino

Expliquons en détails les modules dans notre programme. Sur notre organigramme, nous avons quatre modules.

- **Le module librairie ADS1115 :**

Cette partie fait appel à la bibliothèque de l'ADS1115 par l'intermédiaire du code suivant :

```
#include <Wire.h>
```

```
#include <Adafruit_ADS1015.h>
```

- **Le module configUC :**

C'est le programme de configuration de la carte Arduino et de l'ADS1115. Cette partie du programme est exécutée qu'une seule fois juste au démarrage de la carte Arduino. C'est donc dans cette partie du programme qu'on commande à l'Arduino de mesurer la différence de potentiel initial du sol, ainsi nous obtenons qu'une seule mesure de cette différence de potentiel. On attend pendant 2 secondes avant d'activer le convertisseur pour qu'il n'y ait pas de perturbation sur la mesure de la différence de potentiel.

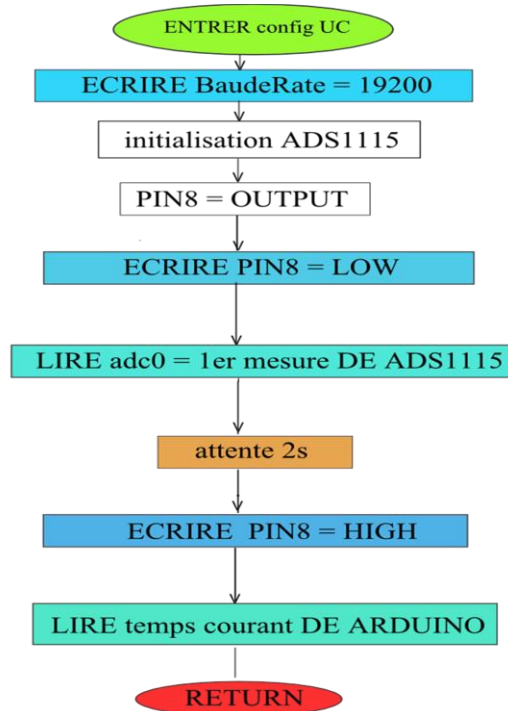


fig.17 : Organigramme du programme setup de l'Arduino

Le module lire port série :

A partir de ce module, nous entrons dans le programme principal de l'Arduino. Cette partie consiste à recevoir la donnée venant de l'utilisateur pour faire le choix de temps d'injection.

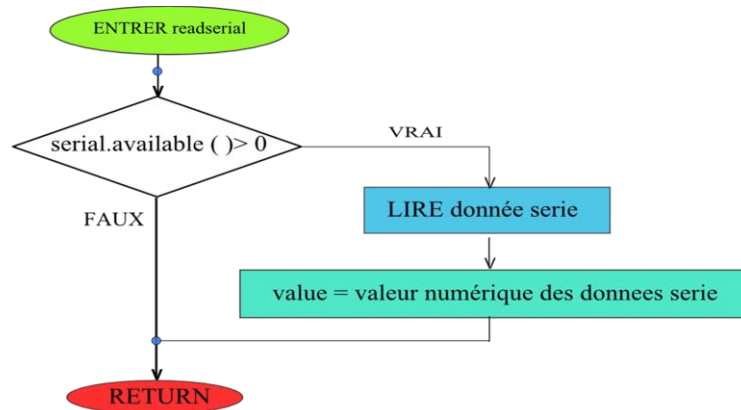


fig.18 : Organigramme de l'attente du choix du temps d'injection

- **Le module mesure pour 2000ms :**

C'est dans ce programme que se déroulera la mesure intégrale de notre processus. On crée une boucle en fonction du temps en utilisant l'instruction « *millis* » comme décrit dans notre algorithme. Si ce temps dépasse 2000ms, l'Arduino coupe directement le convertisseur et on mesure la différence de potentiel jusqu'à ce qu'on atteigne la différence de potentiel d'origine du sol.

Interface graphique :

L'objectif est de créer une interface graphique permettant à l'utilisateur de récolter les données de configurations telles que le nom de fichier d'enregistrement de notre mesure, le choix du temps d'injection et le choix du port série utilisé. Grace à cette

interface, l'utilisateur pourra lire et interpréter les données récoltées et en même moment visualiser l'allure de la forme graphique 2D des données récoltées par rapport au temps.

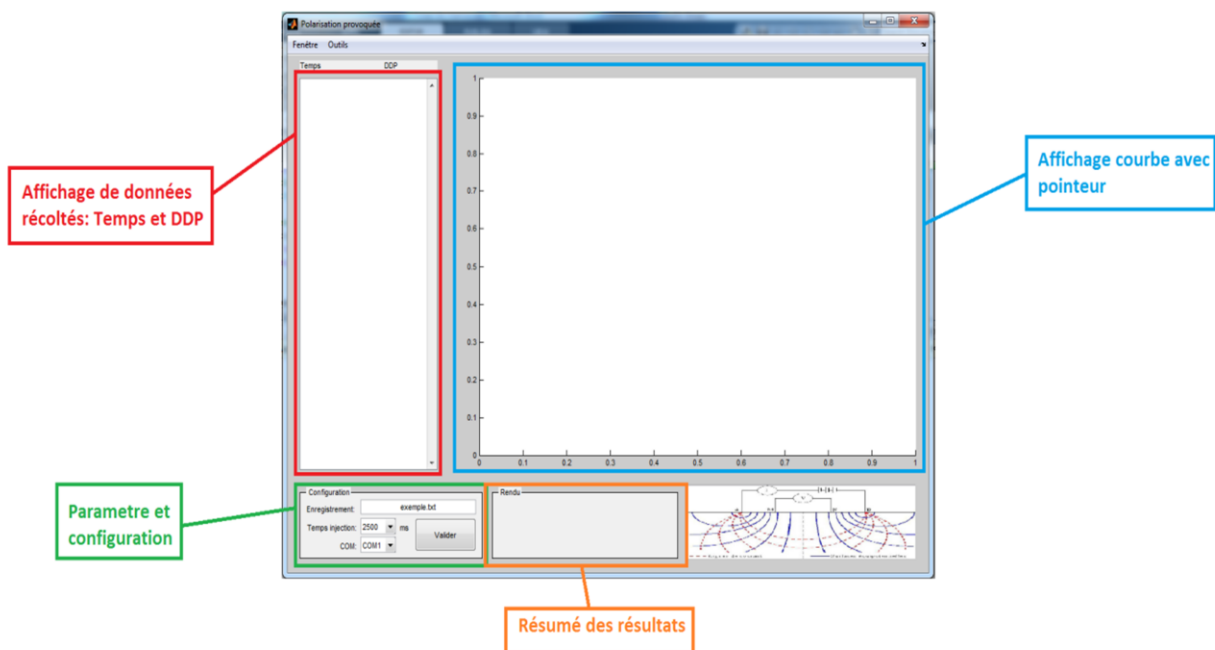


fig.19 : Aperçu de l'interface graphique

La création de l'interface peut être faite de deux façons soit en utilisant les outils de développement du *GUI MATLAB* soit en programmant directement la forme de la fenêtre. Ici, nous étudierons spécialement le programme principale c'est-à-dire le programme régissant l'affichage des donnée reçue venant de l'Arduino plus les calculs résultants, le traçage de la courbe correspondante et l'affichage du résumé du résultat final.

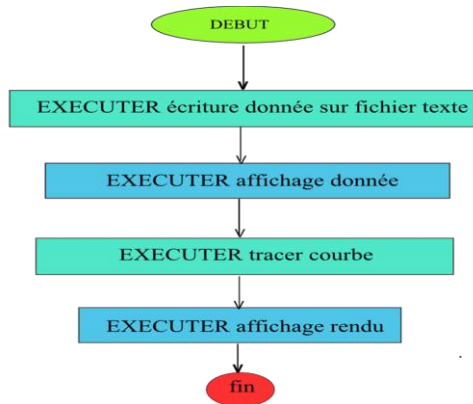


fig.20 : Organigramme du programme principal MATLAB

Pour faciliter le traitement, on enregistre directement les données reçue dans un fichier texte viens en suite l'affichage des données sur l'écran et le traçage de la courbe caractéristique.

- **Le module écriture donnée sur fichier texte :**

Dans ce module, on crée tout d'abord un objet pour la communication série et un objet pour la manipulation de fichier. Ceci fait, on calcule le temps de réception de chaque donnée reçue par l'instruction « *tic* » et « *toc* » cette instruction mesure le temps en seconde. Ensuite on convertie les données reçue en tension et on enregistre ainsi ces données dans le fichier.

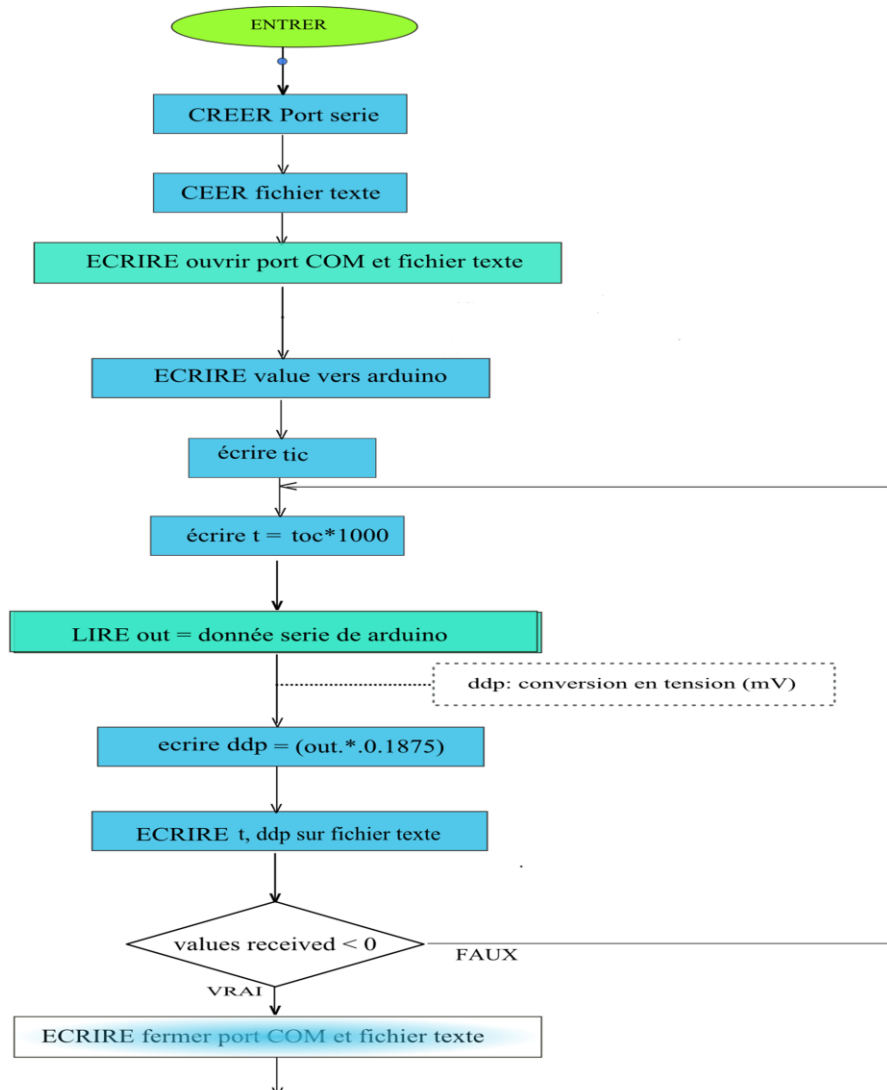


fig.21 : Organigramme d'enregistrement de donnée sur le fichier texte

- **Le module affichage donnée :**

Ce programme consiste à afficher le contenu du fichier texte sur la partie destiné à afficher les données dans l'interface graphique. Voici l'algorithme montrant la démarche de ce programme :

```

▼ VARIABLES
|   data EST_DU_TYPE CHAINE
▼ DEBUT_ALGORITHME
|   data PREND_LA_VALEUR importdata("exemple.txt",")
FIN_ALGORITHME
  
```

L'instruction « *importdata* » charge directement le contenu de notre fichier dans notre espace de travail. Voici un bout de programme pour rediriger le résultat de cette instruction sur notre fenêtre :

```
%Affichage des données collecté sur l'Edit  
data1 = importdata(chemin, '')  
set(vAv, 'Max', 2);  
set(vAv, 'String', data1)  
set(vAv, 'HorizontalAlignment', 'left')
```

Le module *tracer courbe* :

Comme le nom l'indique, ce programme consiste à tracer la courbe caractéristique de la différence de potentiel en fonction du temps.

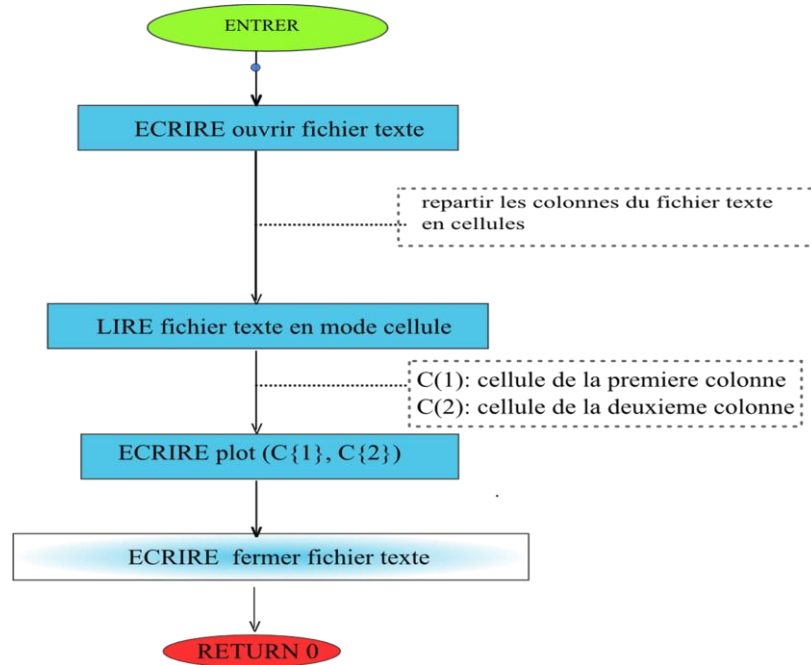


fig.22 : Organigramme pour le traçage de la courbe caractéristique

L'instruction « *textscan* » utilisé ici lit le contenu du fichier sous forme de cellule. Ce qui facilite le traçage de la courbe car chaque colonne du fichier est une cellule d'où l'instruction « *plot(C{1},C{2})* »

- Le module *affichage rendu* :

Ce dernier consiste à afficher le résumé des données indispensables de la polarisation provoquée : la différence de potentiel juste avant coupure de l'injection et le temps d'injection.

ChapitreIII : RESULTATS ET INTERPRETATIONS

TEST DU PROJET SUR CIRCUIT ELECTRIQUE EQUIVALENT :

On peut vérifier la fonctionnalité de notre équipement par la mesure de charge et de décharge d'un condensateur en sachant le schéma électrique équivalent de la polarisation provoquée.

Schéma de montage avec circuit RC :

Sur ce montage, la commande de la marche et arrêt du convertisseur sera simulée par l'alimentation du circuit RC. Voici le schéma de principe de notre étude en laboratoire :

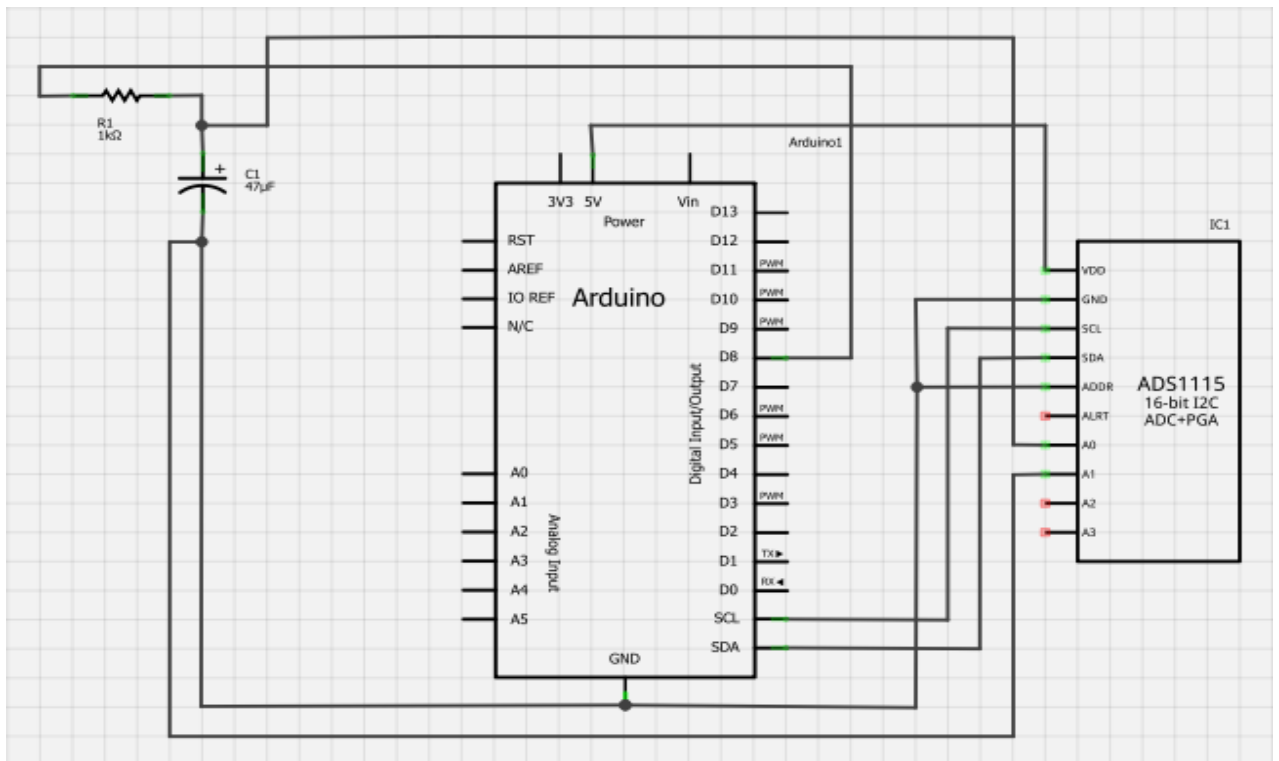


fig.23 : Schéma de montage avec circuit RC

On va étudier la caractéristique de la polarisation provoquée en étudiant tout d'abords le schéma électrique équivalent. Pour ce faire il suffit de varier la valeur de la résistance. Afin de bien comprendre le phénomène, nous mesurerons en même temps la tension de charge du condensateur. Cette méthode nous permet aussi de vérifier si le temps d'injection est bien respecter. Nous choisirons comme valeur de la résistance : 12Ω , 56Ω , 100Ω , $1\text{ k}\Omega$. Nous fixerons le temps d'injection pour 2000ms .

On a les courbes représentant la charge et le décharge du condensateur :

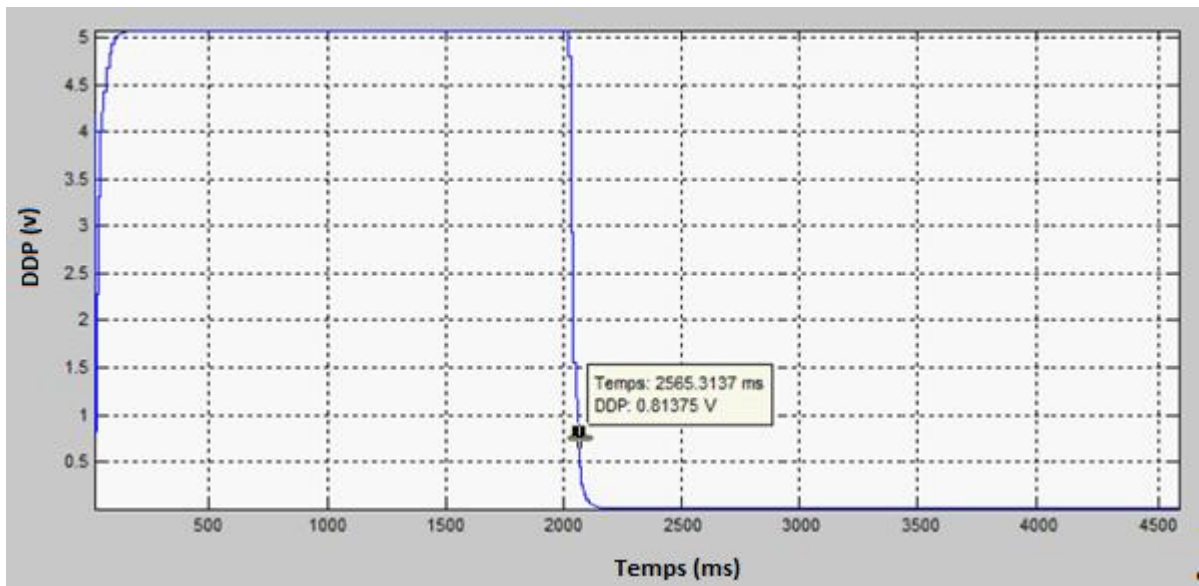


fig24 : Courbe représentant la charge et le décharge du condensateur pour $R = 12\Omega$

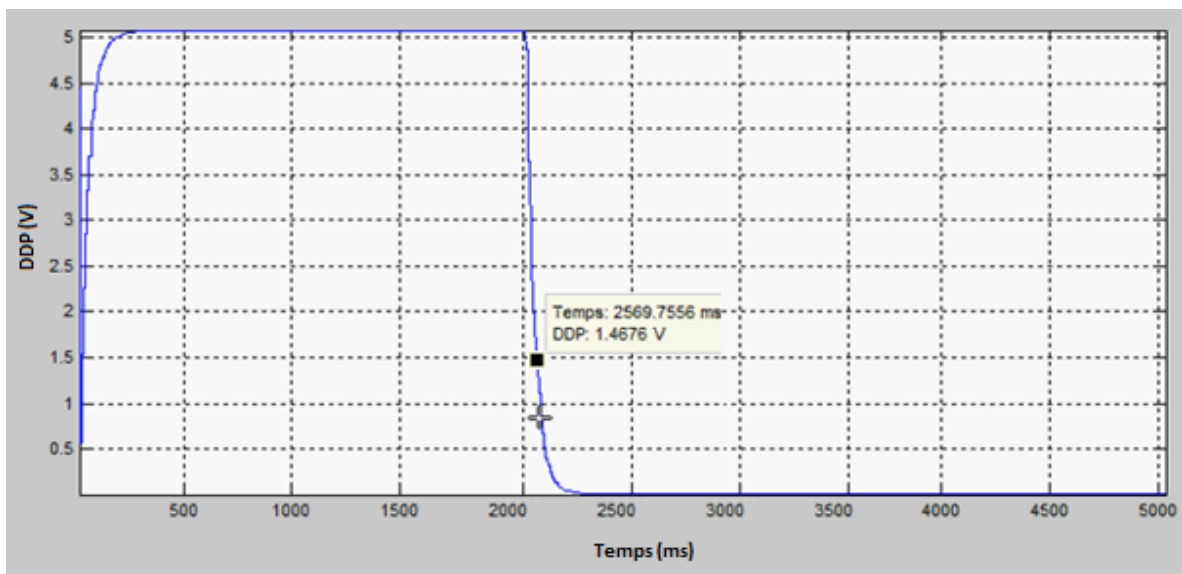


fig.25 : Courbe représentant la charge et le décharge du condensateur pour $R = 56 \Omega$

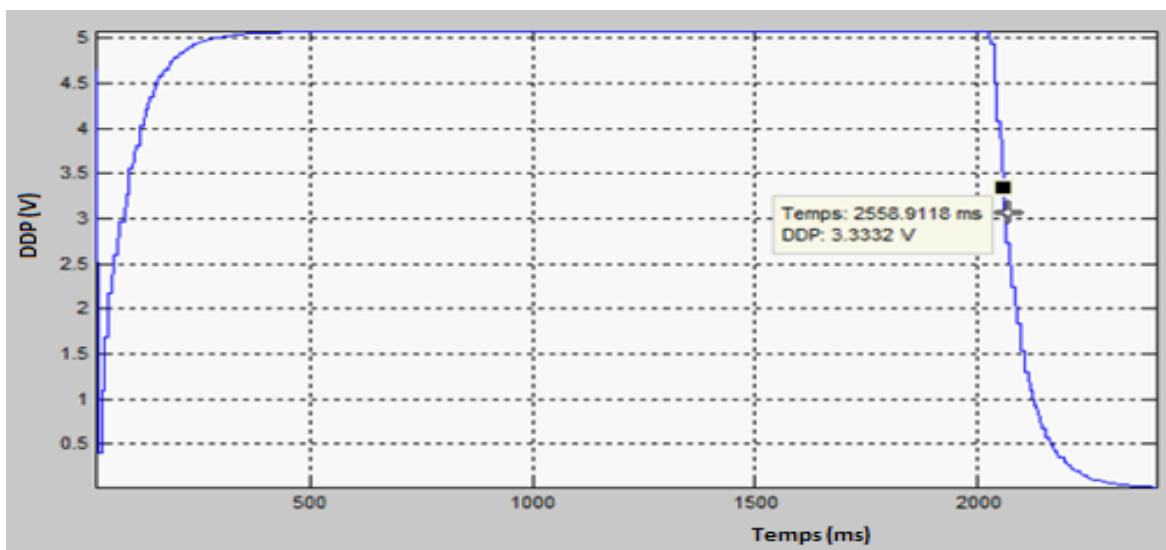


fig.26 : Courbe représentant la charge et le décharge du condensateur pour $R = 100 \Omega$

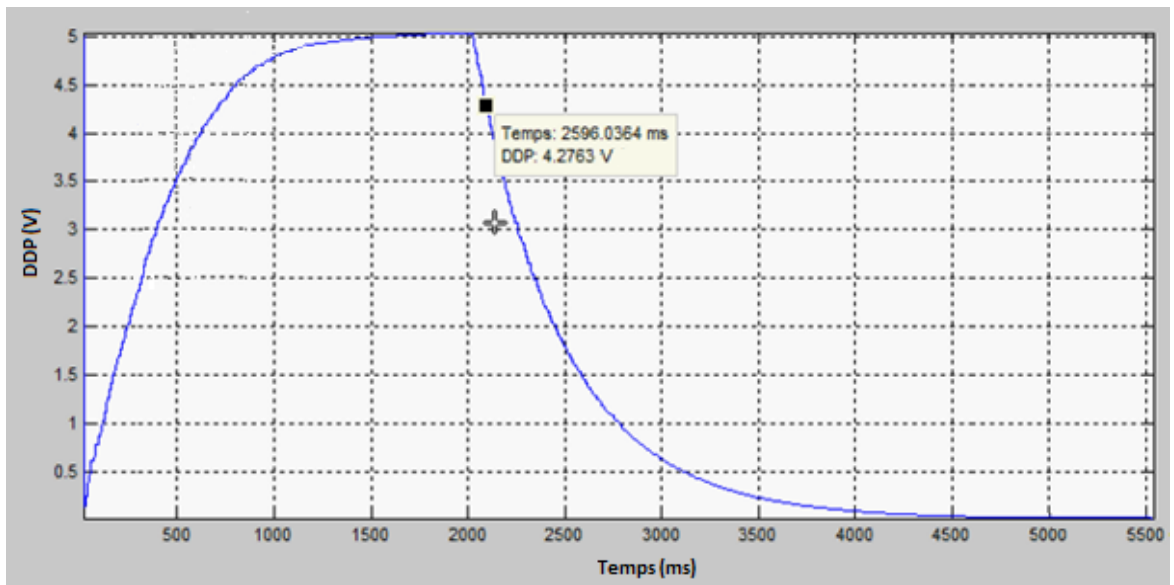
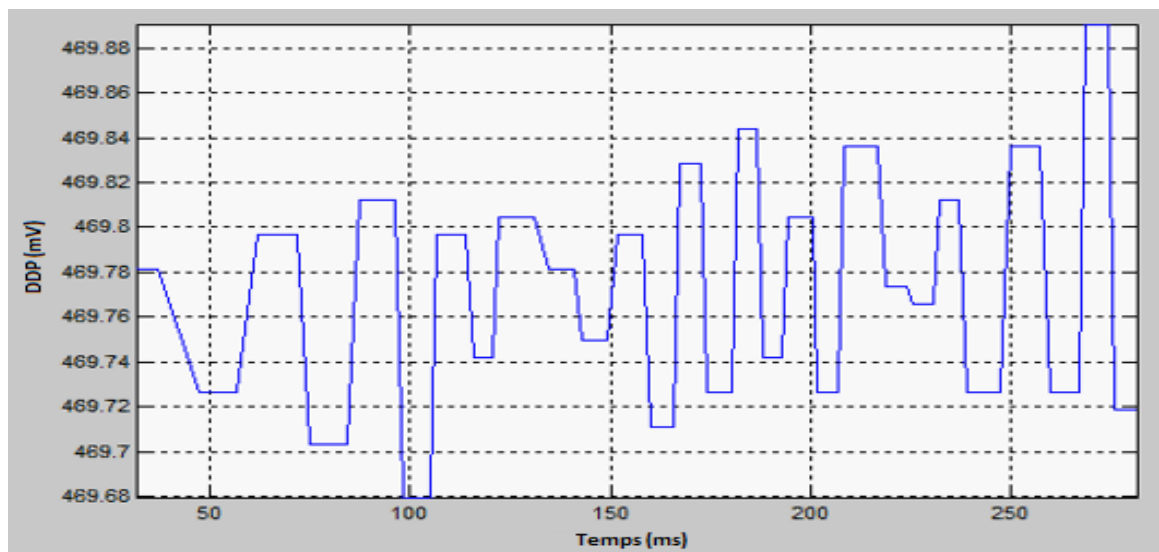


fig.27 : Courbe représentant la charge et le décharge du condensateur pour $R = 1\text{ k}\Omega$

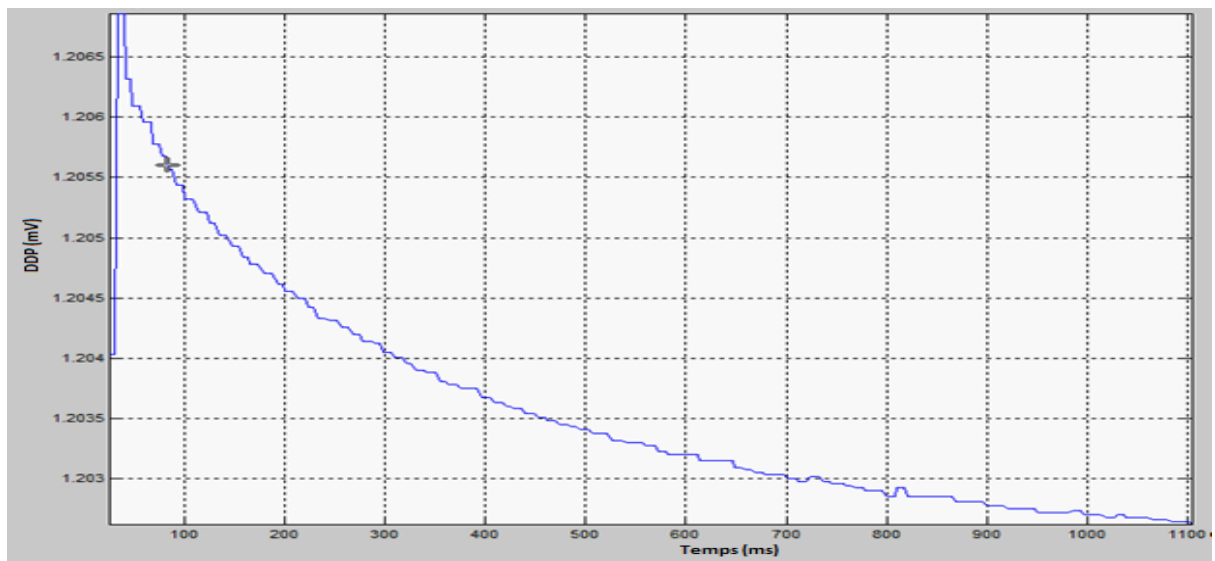
On a pour but de mesurer le potentiel de décharge du sol juste après la coupure du courant d'injection. Quelques résultats sont présentés ci-après:



L'allure de la courbe est ainsi à cause de la présence des erreurs.

Il a fallu rectifier le dispositif, afin de diminuer toute sorte de perturbation pouvant fausser la mesure.

Il nous a fallu vérifier que les fils soient bien connectés avec les électrodes, on a les résultats suivants:



*fig.28 : Mesure sur un sol latéritique**

*sol riche en hydroxyde de fer (rouge)

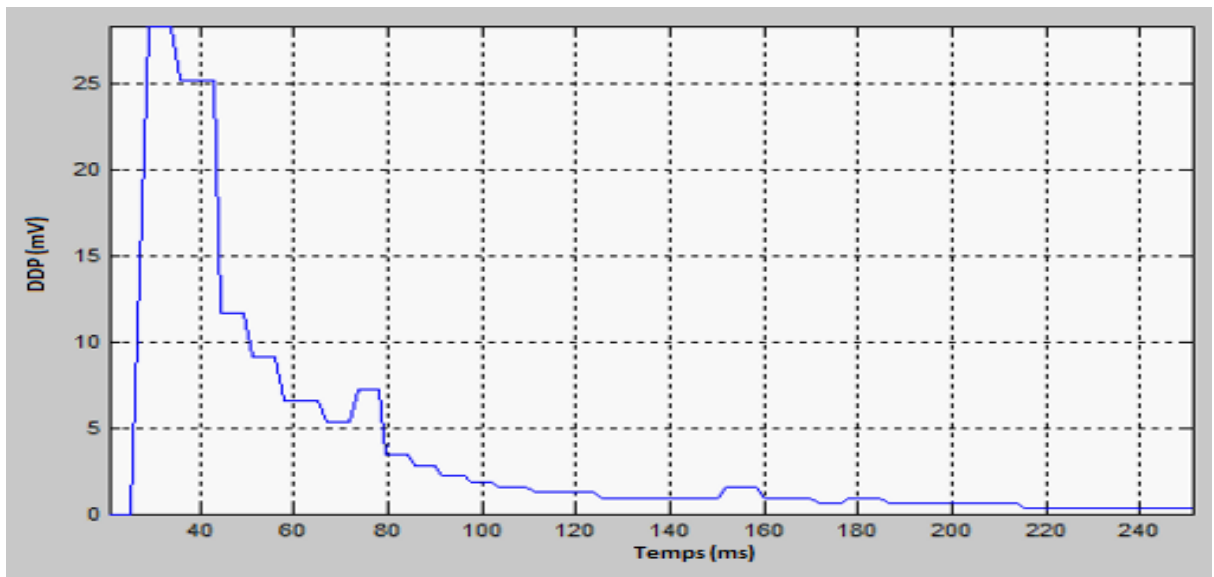


fig.29 : Mesure sur un sol argileux

Il y a présence d'harmonique au niveau de la courbe de décharge.

Il est donc nécessaire d'améliorer notre appareil pour avoir plus de précision et de fiabilité sur les données de mesure de la polarisation provoquée. C'est ainsi qu'on a introduit le filtrage au chapitre suivant.

Chapitre IV : FILTRE NUMÉRIQUE

Le filtrage est une forme de traitement de signal, obtenu en envoyant le signal à travers un ensemble de circuits électroniques (filtrage analogique), qui modifient son spectre de fréquence et/ou sa phase et donc sa forme temporelle.

Son rôle peut s'agir soit :

- D'isoler dans un signal complexe la ou les bandes de fréquences utiles.
- D'éliminer ou d'atténuer des fréquences parasites indésirables, (ce qui est approprié à notre but)

On classe les filtres en deux grandes familles : ANALOGIQUE et NUMERIQUE.

♣ Les filtres numériques sont réalisés à partir de structure intégrée micro programmable(DSP). Ils sont totalement intégrables, souples et performants. Ils sont utilisés chaque fois que c'est possible. Ils sont pour l'instant limités à des fréquences pas trop élevées (<100MHz).

- ♣ Les filtrages analogiques se divisent eux-mêmes en plusieurs catégories :
 - Les filtrages passifs qui font appel essentiellement à des inductances de haute qualité et des condensateurs. Utilisés pour les hautes fréquences.
 - Les filtres actifs sont constitués de condensateurs, de résistances et d'éléments actifs. Ils sont moins encombrants, faciles à concevoir et moins coûteux que les filtres passifs mais restent limités en fréquence (<1MHz).

On a choisi le filtre numérique, vu les avantages de ce dernier par rapport au filtre analogique.

La procédure de la réalisation devient comme suit en ajoutant des filtres :

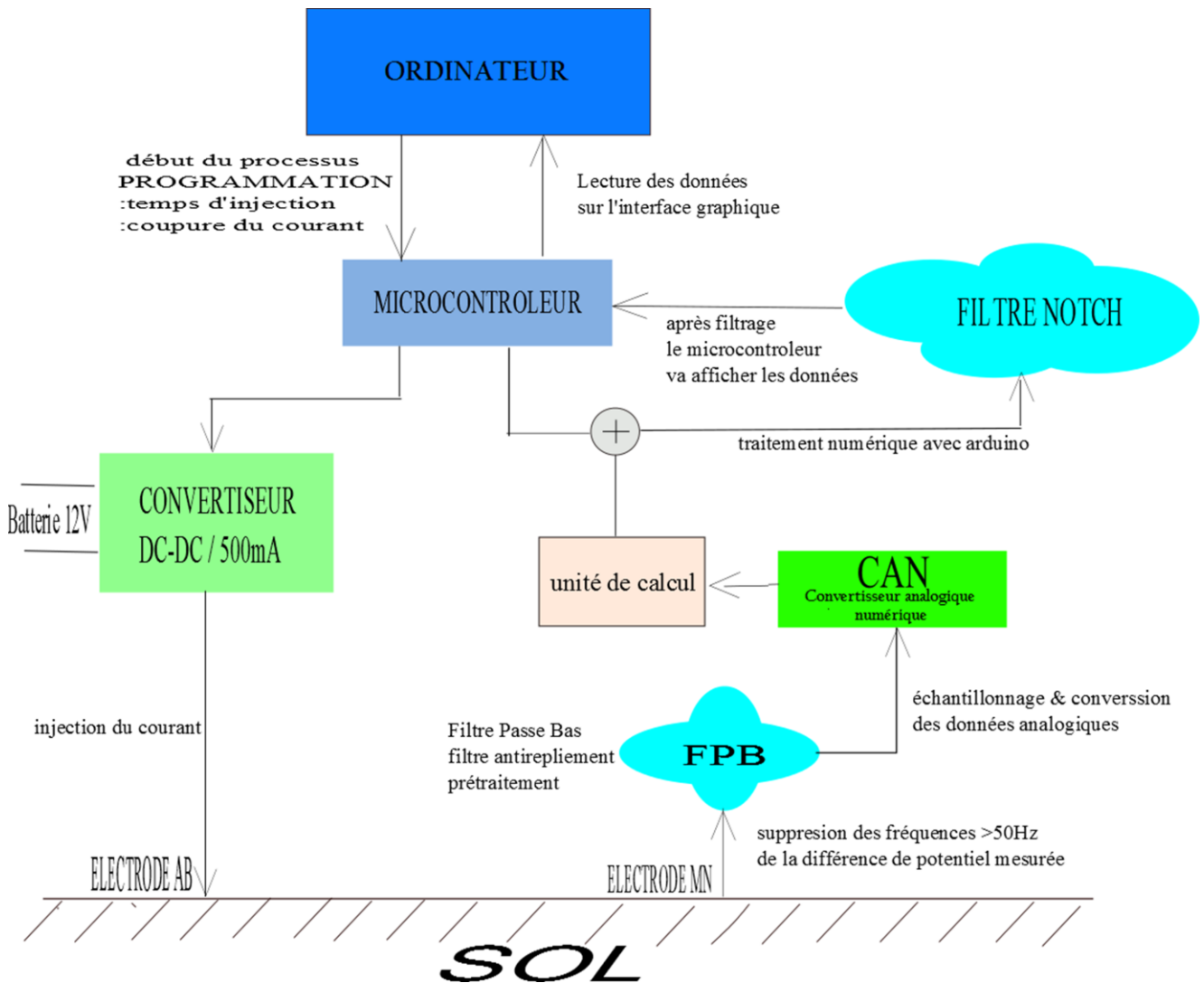


fig.30 schéma synoptique de la réalisation avec filtres

Ainsi, l'appareil de mesure de la polarisation provoquée fonctionnera comme suit : les électrodes A et B seront connecté à un convertisseur DC-DC qui lui injectera le courant continue pour la polarisation du sol. L'injection et la coupure de courant sera contrôlée par un microcontrôleur. De l'autre côté, avant de passer dans un convertisseur analogique numérique, les données venant des électrodes M et N seront d'abord filtrées par un filtre

anti repliement, puis transférer vers le même microcontrôleur, ce dernier sera programmer pour faire le filtrage numérique (« filtre NOTCH »). Ce microcontrôleur sert donc d'interface entre l'utilisateur et notre équipement sur le choix du temps d'injection de courant et de la lecture des résultats obtenus.

Filtre antirepliement

Un filtre antirepliement, est indispensable à la capture et au prétraitement des signaux.

Il permet de travailler dans la zone « utile » du filtre numérique, c'est-à-dire dans la bande de fréquences située entre 0Hz et 50Hz ; C'est un filtre passe bas qui permet de nettoyer le signal avant d'effectuer une conversion analogique-numérique [15]

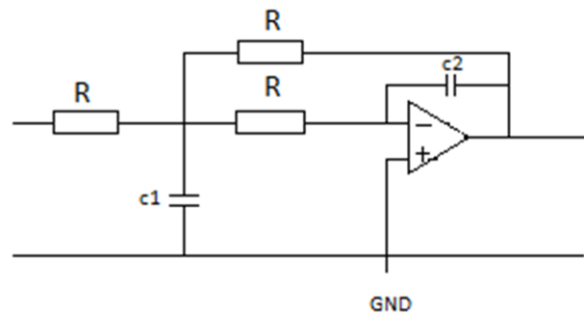


fig.31 filtre actif de 2nd ordre

Filtre de Butterworth
50Hz
Type : Passe-bas
Ordre : 2

Fréquence de coupure :

$R = 100000 \Omega$
 $C1 = 0,675 \mu F$; $C2 = 0,15 \mu F$

On a utilisé un filtre passe bas Rc du 2nd ordre, avec une fréquence de coupure 50Hz, dont le but est de réduire les harmoniques situées en dehors de la bande utile. Son rôle est de limiter le contenu spectral du signal aux fréquences qui nous intéressent.

Le filtrage permet de supprimer certaines fréquences du spectre de la différence de potentiel VE, puis on obtient en sortie une différence de potentiel VS dont le spectre correspond au spectre de VE auquel on a supprimé les fréquences filtrées. [16]

Principe du filtrage numérique

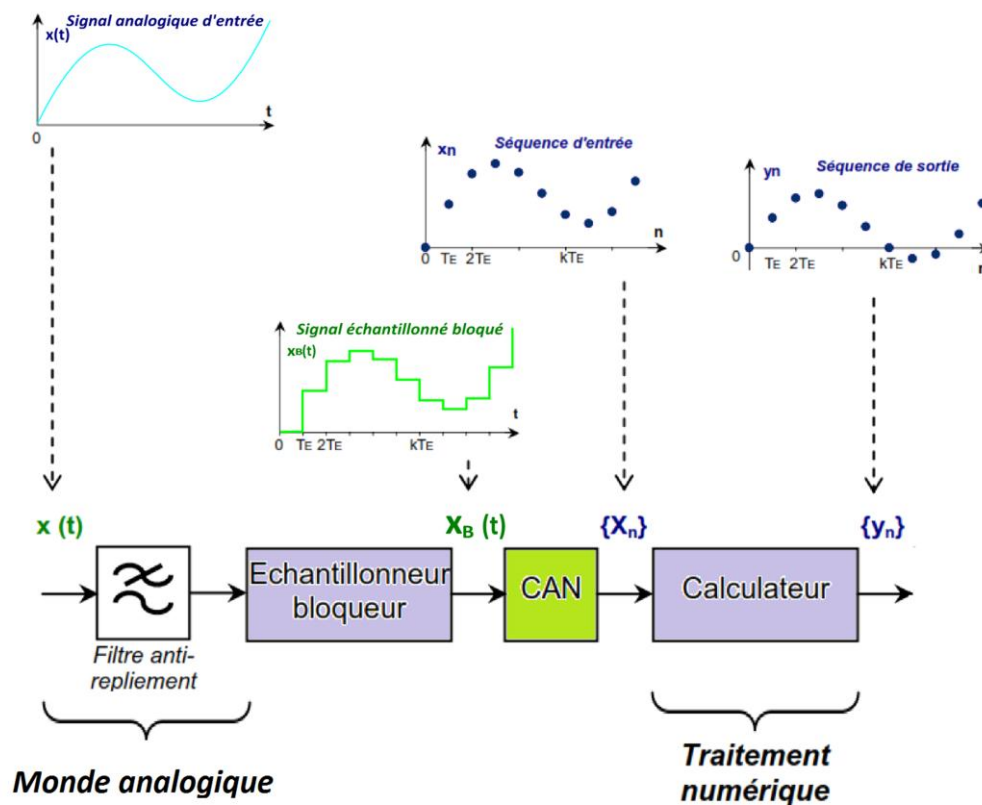


fig.32 chaîne de traitement de signal

- ✚ le signal analogique d'entrée est échantillonné et bloqué (E/B)
- ✚ le signal obtenu est ensuite converti par un CAN en signal numérique
- ✚ l'unité de calcul, ou bien le calculateur comporte les opérations $+$, \times et « le retard ».

la connaissance de la fonction de transfert du filtre à réaliser permet de déterminer l'algorithme, et donc de programmer l'unité de calcul.

Un filtre numérique peut être défini par une équation aux différences. La forme générale du filtre d'ordre M est la suivante [17]

$$y[n] = \sum_{k=0}^N b_k x[n-k] - \sum_{k=1}^M a_k y[n-k]$$

Cette équation fait intervenir non seulement les échantillons retardés du signal d'entrée mais également les échantillons retardés du signal de sortie, dans le domaine temporel on obtient :

$$y(Z) = \sum_{i=0}^N a_i Z^{-i} x(Z) - \sum_{i=1}^M b_i Z^{-i} y(Z)$$

C'est la transformée en Z qui n'est autre que la transformée de Laplace.

Il existe deux sortes de filtres numériques :

- Filtre numérique non récursif (ou filtre à réponse impulsionnelle finie RIF)
- Filtre numérique récursif (ou filtre à réponse impulsionnelle infinie RII)

Les filtres RII, peuvent être conçus par des méthodes semblables à ceux utilisés pour les filtres analogiques.

D'où l'intérêt d'utiliser le filtre récursif et de travailler sur le filtre NOTCH :

Un filtre numérique est caractérisé par :

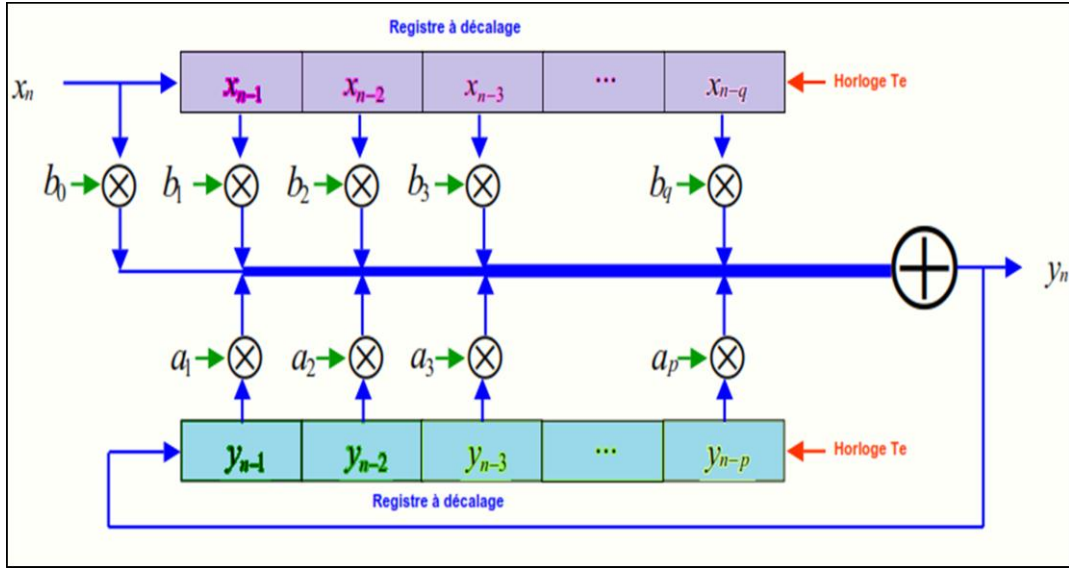
- n : le nombre d'échantillons (c'est un nombre entier, supérieur à 1) les coefficients réels [18]

Schéma-bloc d'un filtre récursif

Forme générale d'un filtre :

$$H(z) = \frac{a_0 + a_1 Z^{-1} + \dots + a_N Z^{-N}}{1 + b_1 Z^{-1} + \dots + b_N Z^{-N}}$$

« Z^{-1} » est l'opérateur de retard.



Toutes les T_e secondes, les valeurs sont décalées dans les registres, multipliées par leur coefficient respectif et additionnées pour donner y_n .

Transformée en Z.

$$y_n = a_1 \cdot y_{n-1} + a_2 \cdot y_{n-2} + \dots + a_p \cdot y_{n-p} + b_0 \cdot x_n + b_1 \cdot x_{n-1} + \dots + b_q \cdot x_{n-q} \quad (i)$$

Pour passer de l'algorithme, relatif du domaine temporel, à la variable Z, on utilise la règle de passage très simple :

$$\begin{cases} x_{n-i} \rightarrow X(Z)Z^{-i} \\ y_{n-i} \rightarrow Y(Z)Z^{-i} \end{cases}$$

L'équation (i) devient :

$$Y(Z) = a_1 Y(Z)Z^{-1} + a_2 Y(Z)Z^{-2} + \dots + a_p Y(Z)Z^{-p} + b_0 X(Z) + b_1 X(Z)Z^{-1} + \dots + b_q X(Z)Z^{-q}$$

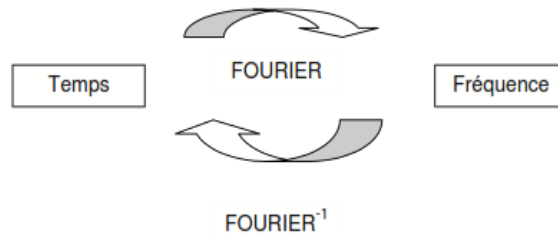
Après factorisation :

$$Y(Z)(1 - a_1Z^{-1} - a_2Z^{-2} - \dots - a_pZ^{-p}) = X(Z)(b_0 + b_1Z^{-1} + \dots + b_qZ^{-q}) \quad (\text{iii})$$

On a tiré la fonction de transfert dans le domaine temporel.

$$T(Z) = \frac{X(Z)}{Y(Z)}$$

Pour passer dans le domaine fréquentielle. On va utiliser la transformée de Fourier [19] :



$$T(Z) = \frac{b_0 + b_1e^{-j\omega T_e} + \dots + b_qe^{-jq\omega T_e}}{1 - a_1e^{-j\omega T_e} + a_2e^{-j2\omega T_e} \dots + b_pe^{-jp\omega T_e}} = \frac{Y(Z)}{X(Z)} \quad (\text{iv})$$

Voici les coefficients :

b = [0.96508099, -1.19328255, 2.29902305, -1.19328255, 0.96508099]

a = [1. , -1.21449348, 2.29780334, -1.17207163, 0.93138168]

MISE EN ŒUVRE ET IMPLEMENTATION DU FILTRE

NUMÉRIQUE(RII) :

Notre filtre numérique (notch) est effectué de façon à enlever le maximum de bruit (en particulier les harmonique de 50Hz). On rejette ou atténue les harmoniques de 50 Hz. Ce filtrage numérique est réalisé de manière logicielle par le microcontrôleur arduino.

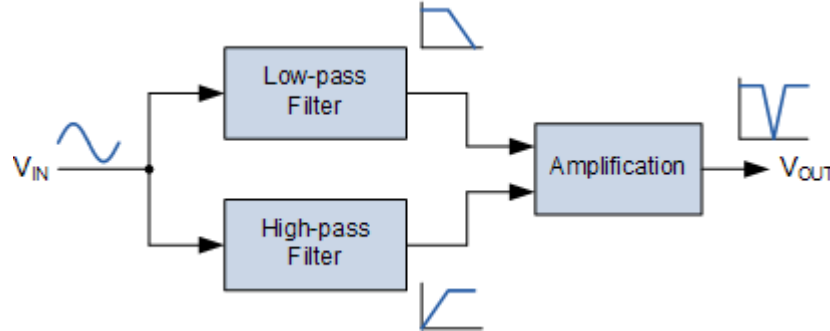


fig.33 Filtre NOTCH en combinant les filtres passé bas et passé haut

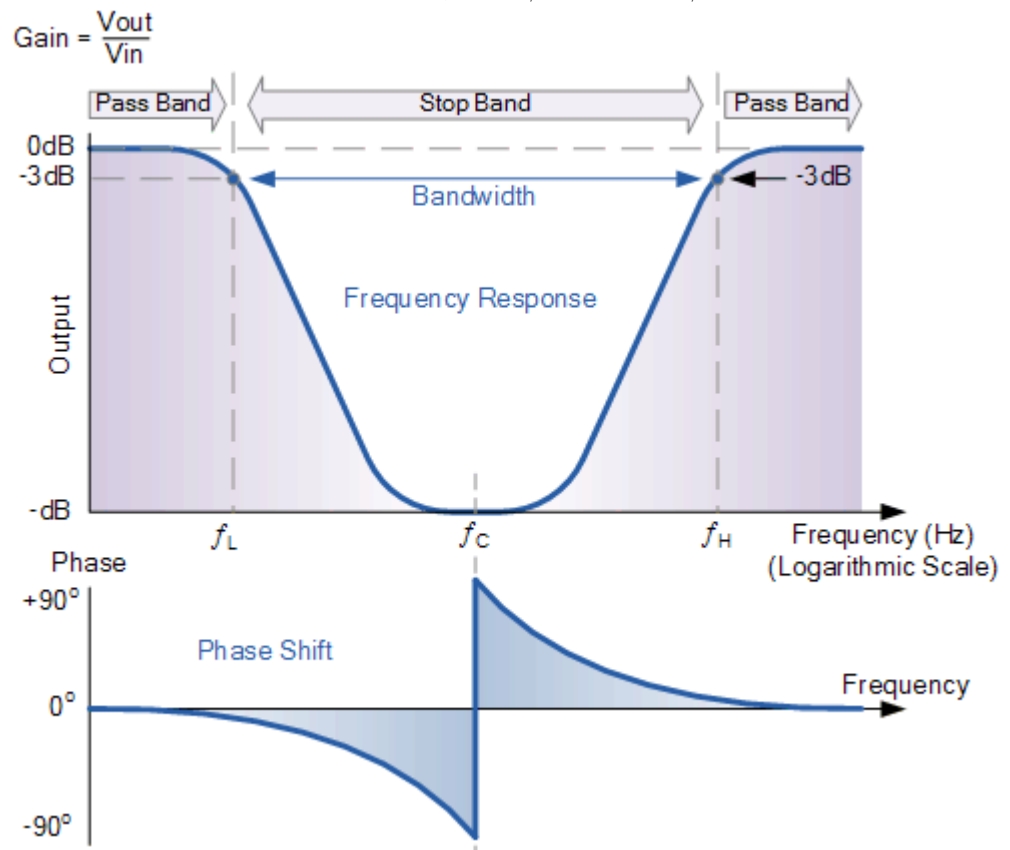


fig 34Reponse d'un filtre rejeteur

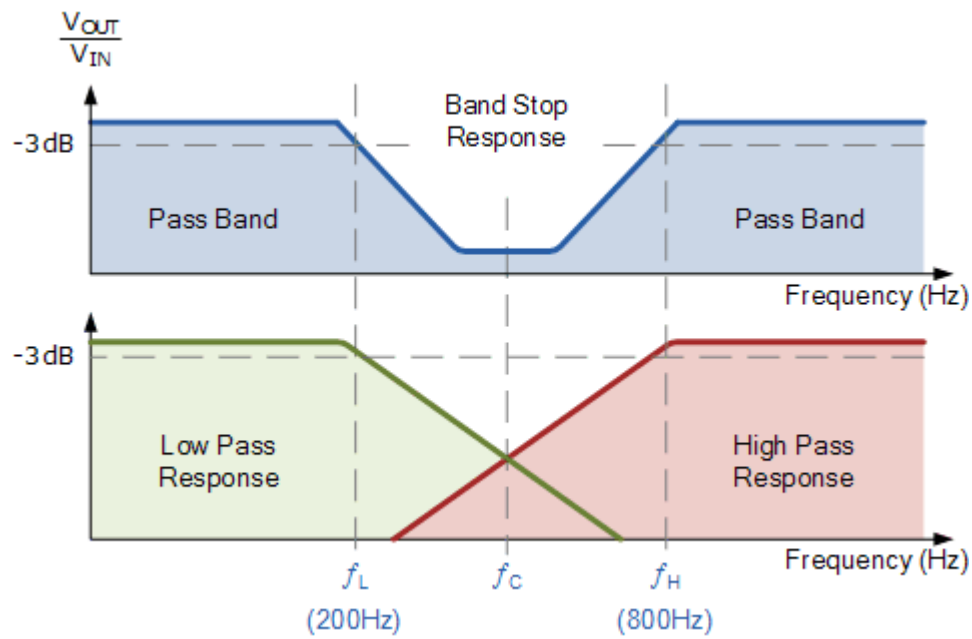


fig 35 Caractéristique d'un filtre coupe bande

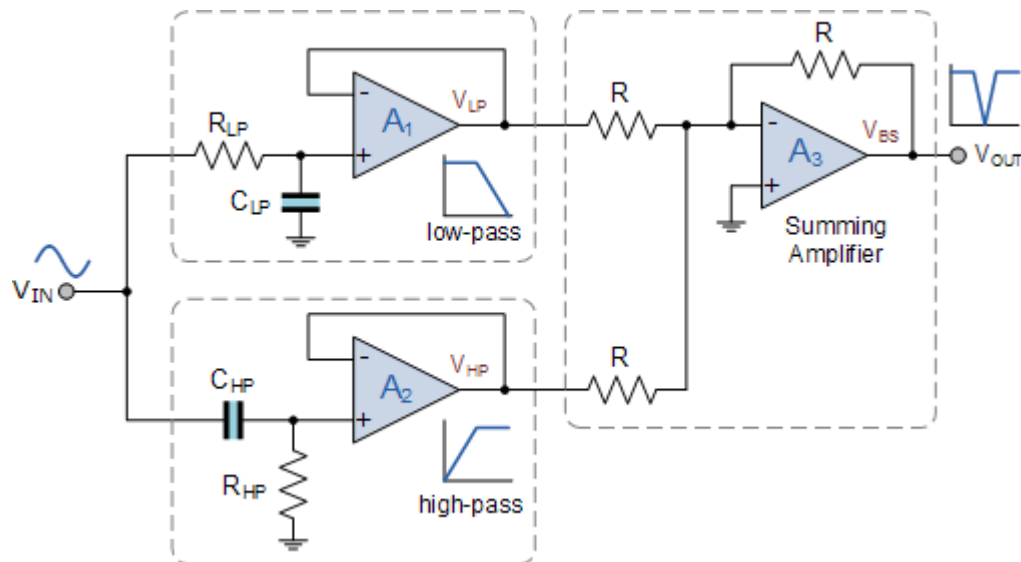


fig 36 Circuit d'un filtre NOTCH

On va concevoir une bande étroite de deux ampli-op, RC cran filtre avec une fréquence centrale de cran, f_N de 50Hz et une largeur de bande à -3 dB de 75 Hz. les

condensateurs 0.1uF dans la conception. Compte tenu des données : $f_N = 50\text{Hz}$, $BW = 75\text{Hz}$ et $C = 0.1\mu\text{F}$.

Calcul de la fréquence de coupure du filtre réjecteur , on a :

$$f = \frac{1}{2\pi RC} \text{ Hz}$$

Pour le filtre passe bas :

$$f_l = \frac{1}{2\pi R_l C} = 25\text{Hz} \text{ avec } C=0.1\mu\text{F}$$

Pour le filtre passe haut :

$$f_h = \frac{1}{2\pi R_h C} = 100\text{Hz} ; C=0.1\mu\text{F}$$

Pour la fréquence de coupure :

On a ;

$$f_c = \sqrt{f_l \times f_h}$$

La largeur de bande :

$$f_{BW} = f_h - f_l$$

Le facteur de qualité :

$$Q = \frac{f_c}{f_{BW}}$$

En appliquant les coefficients a et b sous Matlab on obtient la figure suivante :

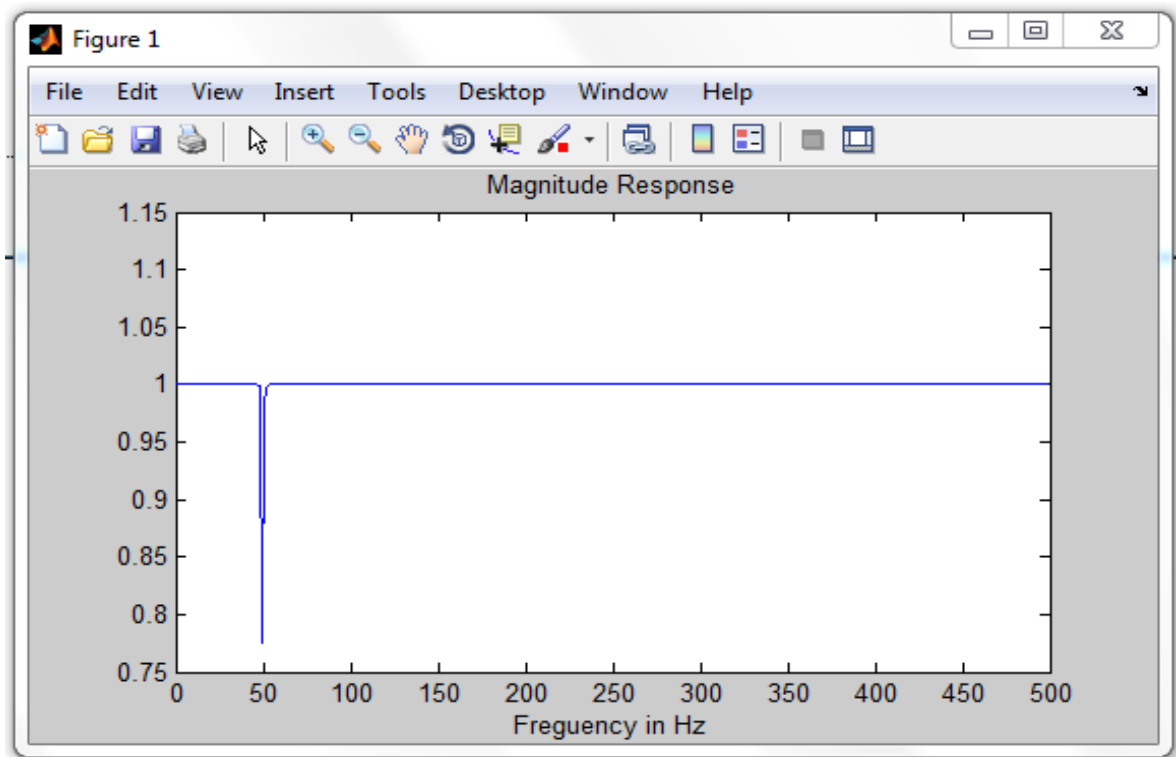


fig.37 : Filtre notch en appliquant les coefficients $a[i]$ et $b[i]$

Résultats après filtrage

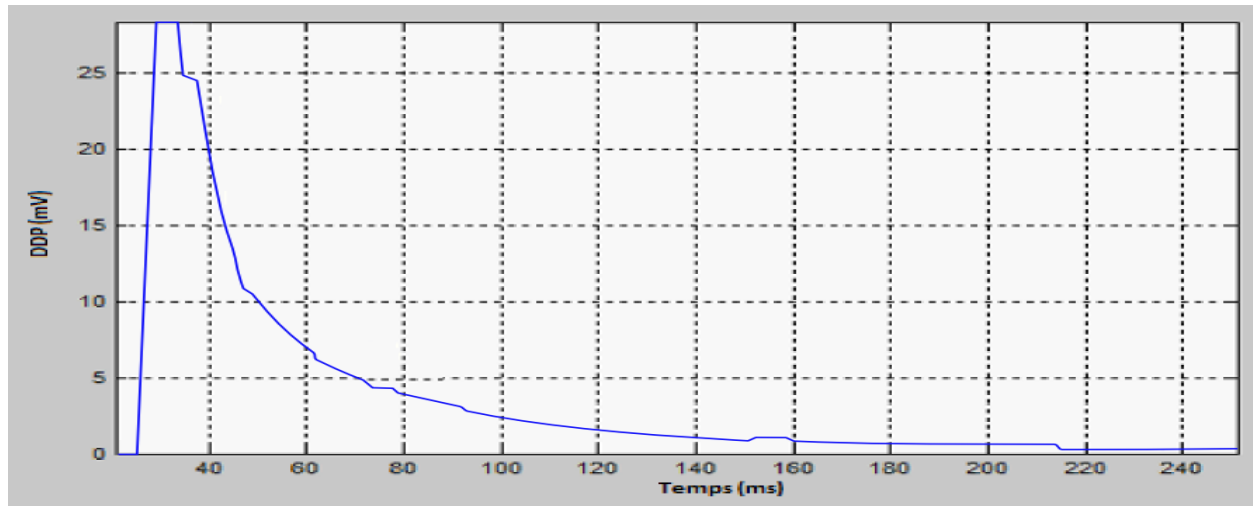
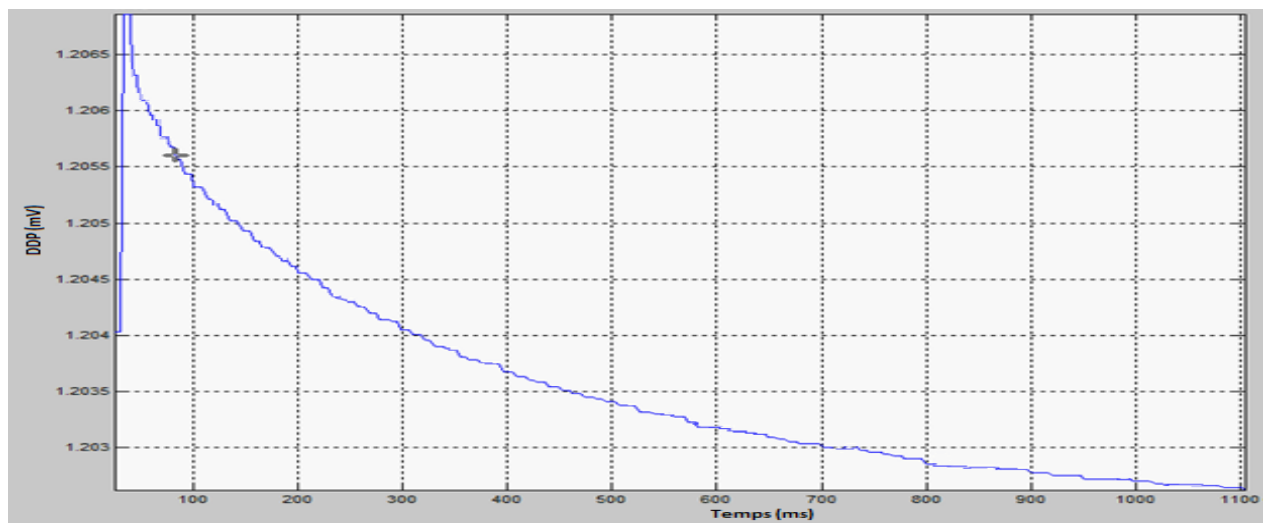


fig.38 : Mesure sur un sol argileux



*fig.39: Mesure sur un sol latéritique**

DISCUSSIONS

La compréhension de la polarisation provoquée en géophysique de surface nous a permis de concevoir un appareil de mesure permettant de la mesurer.

L'appareil répond au besoin géophysique concernant la polarisation provoquée, mais nécessite encore des améliorations.

Il est vérifié d'après les résultats sur les condensateurs que le temps de charge du condensateur est bien respecté. Après comparaison de ces différentes courbes, on constate que plus la valeur de la résistance augmente plus le temps de décharge augmente et la chute de la courbe s'éloigne progressivement de la coupure du charge.

Ainsi nous pouvons en déduire par rapport à ces résultats que plus le sol est résistant plus le temps de décharge est lent.

Sur les mesures sur terrain, il est à noter qu'après injection et mesure, le sol ne peut être utilisé une nouvelle fois qu'après plusieurs heures.

Au vu des résultats précédents, nous avons constaté des erreurs sur l'allure des courbes (présence de bruits et harmoniques au niveau des courbes, dues à l'existence de fréquence indésirable). Par conséquent, il est nécessaire d'ajouter un filtre rejeteur empêchant le signal parasite de fréquence « 50Hz de la JIRAMA » ou à la limite d'atténuer les effets de ce signal et de ses parasites.

Par conséquent, après filtrage, les résultats obtenus sont satisfaisants.

CONCLUSION

On a pu étudier et comprendre ce qu'est la polarisation provoquée, puis la modéliser afin de l'exploiter. Il a fallu comprendre l'origine, le fonctionnement et l'utilité de ce phénomène avant de concevoir un équipement électronique et informatique permettant de le mesurer.

En se basant sur l'équation mathématique caractérisant la polarisation provoquée et en manipulant cette équation pour être matérialisée physiquement jusqu'à la création d'une interface pour faciliter la communication de cet équipement avec l'utilisateur, on a pu comprendre et adopter la méthodologie à suivre pour faire une recherche scientifique et concevoir un système performant pour exploiter ce phénomène.

Il est bénéfique de concevoir un équipement permettant de mesurer la polarisation du sol. Les chercheurs peuvent aussi utiliser cet équipement pour des recherches en laboratoire ou des travaux pratiques sur terrain. Il est préférable d'ajouter une perspective d'amélioration de ce projet en lui ajoutant un résistivimètre. L'ajout d'un filtre anti repliement et d'un filtre numérique NOTCH nous a beaucoup aidés à améliorer l'appareil, et nous permettant ainsi d'avoir plus de précision et de fiabilité sur les données de mesure de la polarisation provoquée.

Les résultats obtenus sont satisfaisants, mais néanmoins nécessitent encore des améliorations pour avoir plus de précisions.

Enfin cet appareil de moindre coût serait un outil qui pourra faciliter encore plus la recherche en géophysique appliquée et ainsi d'y ajouter des connaissances supplémentaires intéressantes. Cependant ses performances sont encore à améliorer au cours du temps.

REFERENCES

Bibliographie :

[1] Michel Chouteau, Méthodes électriques, Géophysique appliquée II GLQ 3202, Ecole Polytechnique, Été 2001, page 1

[2] YASAMAN KHAJEHNOURI
DÉPARTEMENT DES GÉNIES CIVIL, GÉOLOGIQUE ET DES MINES
ÉCOLE POLYTECHNIQUE DE MONTRÉAL, page 3

[3] Michel Chouteau, Méthodes électriques, Géophysique appliquée II GLQ 3202, Ecole Polytechnique, Été 2001, page 26

[4] YASAMAN KHAJEHNOURI
DÉPARTEMENT DES GÉNIES CIVIL, GÉOLOGIQUE ET DES MINES
ÉCOLE POLYTECHNIQUE DE MONTRÉAL, page 3

[5] Frédérique BADON, Application de la polarisation provoquée à la discrimination des teneurs en argile et en eau, Université d'Avignon, Faculté des Sciences DESS Hydrogéologie et Environnement, 1998, page 2,3

[6] Frédérique BADON, Application de la polarisation provoquée à la discrimination des teneurs en argile et en eau, Université d'Avignon, Faculté des Sciences DESS Hydrogéologie et Environnement, 1998, page 8

[7] Michel Chouteau, Méthodes électriques, Géophysique appliquée II GLQ 3202, Ecole Polytechnique, Été 2001, page 42

[8] Frédérique BADON, Application de la polarisation provoquée à la discrimination des teneurs en argile et en eau, Université d'Avignon, Faculté des Sciences DESS Hydrogéologie et Environnement, 1998, page 9

[9] Frédérique BADON, Application de la polarisation provoquée à la discrimination des teneurs en argile et en eau, Université d'Avignon, Faculté des Sciences DESS Hydrogéologie et Environnement, 1998, page 10

[10] Michel Chouteau, Méthodes électriques, Géophysique appliquée II GLQ 3202, Ecole Polytechnique, Été 2001, page 44

[11] Cécile Noel, Suivi de la biodégradation des hydrocarbures par le couplage des mesures géophysiques électriques du sol (polarisation provoquée) et des analyses des gaz (concentration du CO₂ et isotopie du carbone), Université d'Orléans, 10 Décembre 2014, page 49

[12] Frédérique BADON, Application de la polarisation provoquée à la discrimination des teneurs en argile et en eau, Université d'Avignon, Faculté des Sciences DESS Hydrogéologie et Environnement, 1998, page 14

[13] LECHALUPE Julien, Cours d'initiation à Arduino, Université Paul Sabatier, Mai 2014, page 4

[14] Alain T., Mars 2006. Reconnaissance Géophysique pour le génie civil. Cours en ligne :
<http://www.labos.upmc.fr/sisyph/dga/courslabo/recongeophy.pdf>
<http://petoindominique.fr/pdf/cours8.pdf>.

[16] Traitement du signal pour géologues et géophysiciens: Techniques de base

Par Jean-Luc Mari, F. Glangeaud, Françoise Coppens

[17] Traitement du signal pour géologues et géophysiciens: Techniques de base

Par Jean-Luc Mari, F. Glangeaud, Françoise Coppens

[18] Cours Filtrage numérique d'un signal d'évolution lente avec un microcontrôleur Version 1.2.2. page2

[19] Pôles et zéros des prédicteurs numériques

[http://documents.irevues.inist.fr/bitstream/handle.PD TEXTE.pdf?sequence=1?](http://documents.irevues.inist.fr/bitstream/handle.PD%20TEXTE.pdf?sequence=1)

[20] *SYSICAL : JUNIOR - R1 PLUS - ELREC-T- //SYSTEME MULTI ÉLECTRODES /Manuel d'utilisation //Septembre 2003 (page 48)*

Webographie : mars2016 au novembre2016

[w1] GEXPLORE, La polarisation provoquée, page 1

[w1] <http://www.gecif.net/>

[w2] <http://henrysbench.capnfatz.com/henrys-bench/arduino-ads1115-module-getting-started-tutorial/>

Résumé

La géophysique constitue un axe de développement pertinent dans la problématique des sols, la polarisation provoquée est l'une des méthodes géophysiques pour la prospection souterraine. Le présent travail consiste à concevoir un appareil pour la polarisation provoquée qui a pour principe l'injection de courant dans le sous-sol, ce courant induit une différence de potentiel. Après coupure de ce dernier, la décharge progressive de la différence de potentiel est mesurée par une paire d'électrodes.

Ce travail est basé dans la partie *software* à la réalisation d'une interface, sur ce, on fait appel à MATLAB et ARDUINO IDE. Après réalisations et tests, dues aux bruits et harmonique de l'environnement, les résultats obtenus ne sont pas satisfaisants. Alors l'amélioration de l'équipement consiste à ajouter un filtre rejeteur, ce filtre est choisi comme étant numérique. Par conséquent une conversion de l'analogique en numérique est alors indispensable. La réalisation de l'appareil dérive du processus suivant : le microcontrôleur est programmé d'abord par un PC pour l'injection du courant par le CONVERTISSEUR DC-DC/500mA dans le sol, ensuite après la coupure du courant, la différence de potentielle mesurée est filtrée par un filtre antirepliement avant de passer dans le CAN, puis le FILTRE NOTCH fonctionne pour avoir les données voulues. Les résultats sont maintenant satisfaisants et exploitables pour les recherches.

Mots clés: polarisation provoquée, arduino, CAN, filtre numérique, filtre NOTCH

Abstract

Geophysics establish an axis of a relevant development in soil's problematic, an induced polarization is one of geophysics method for the underground prospection. This task consists in conceiving a device for the incited polarization, that the purpose is to inject the electric current into the ground; this current induces a potential difference. Then, after its cut, the advanced landfill of the potential difference is measured by the pair of electrode.

This work is based in software's part about interface realization; in that case, we take MATLAB and ARDUINO IDE such as reference. After the realization and test, caused by noise and harmonics of the environment, the acquired results are not so gratifying. Therefore, the improve equipment consist in adding a band-stop filter, this filter is considered as numerical. Consequently, the numeric version of this analogy is required. The realization of the appliance is exposed by this following process: first, the microcontrôleur is planned by a PC for the current injection into the ground with the DC-DC/500mA converter, next, after the electric current's cut, the potential difference is measured and filtered, by an antirepliement filter before passing into the CAN. Then, the NOTCH filter operates to have the desired data. In fact, the results are now not only satisfactory, but also, exploitable.

Keywords: induced polarization, arduino, CAN, digital filter, NOTCH filter.

Encadreur

Professeur RAMBOLAMANANA Gerard

Impétrant

ANDRIANIRINA MILISON Tovo Avotra

Tel: +261326082734

Email: Avotraandrianirina@gmail.com