

# TABLE DES MATIÈRES

<b>REMERCIEMENTS</b> .....	<b>I</b>
<b>TABLE DES MATIÈRES</b> .....	<b>II</b>
<b>NOMENCLATURE</b> .....	<b>IV</b>
<b>LISTE DES ACRONYMES ET ABREVIATIONS</b> .....	<b>V</b>
<b>LISTE DES ANNEXES</b> .....	<b>VI</b>
<b>LISTE DES FIGURES</b> .....	<b>VI</b>
<b>LISTE DES TABLEAUX</b> .....	<b>VIII</b>
<b>INTRODUCTION</b> .....	<b>1</b>
<b>CHAPITRE 1. GÉNÉRALITÉS</b> .....	<b>3</b>
1.1 PROJET PHEDER.....	3
1.2 CONTEXTE DU STAGE.....	3
1.3 PROBLÈME DES PERMISSIONNAIRES .....	4
1.4 DÉROULEMENT DU STAGE .....	5
1.5 MÉCANISME DE COMPENSATION D'ÉMISSION DE CARBONE.....	6
1.6 PUISSANCE ÉLECTRIQUE ET MESURE DE LA PUISSANCE.....	6
1.6.1 Généralités sur la puissance.....	6
1.7 MESURE DE LA PUISSANCE .....	10
1.7.1 Utilisation d'un équipement de mesure.....	10
1.8 ACQUISITION AUTOMATIQUE DE DONNÉE.....	11
1.8.1 Arduino.....	11
1.8.2 Environnement de programmation Processing .....	15
1.8.3 Logiciels de simulation.....	15
1.8.4 Transformateur d'Intensité (TI).....	17
<b>CHAPITRE 2. CONCEPTION ET RÉALISATION D'UN SYSTÈME D'ACQUISITION AUTOMATIQUE DE TENSION ET DU COURANT</b> .....	<b>21</b>
2.1 CAPTEURS DE TENSION ET DE COURANT .....	22
2.1.1 Capteur de tension.....	22
2.1.2 Capteur de courant.....	23
2.2 CARTES DE CONDITIONNEMENT .....	27
2.2.1 Carte pour le TT .....	28
2.2.2 Carte pour le TI .....	30
2.3 ARDUINO .....	31
2.3.1 Calcul des valeurs efficaces et instantanées.....	32
2.3.2 Calcul de la puissance active.....	35
2.3.3 Calcul de la puissance apparente et du facteur de puissance .....	35

2.3.4	<i>Calcul de l'énergie</i> .....	35
2.3.5	<i>Erreurs à considérer</i> .....	36
2.3.6	<i>Transfert de données vers le port série</i> .....	38
2.4	TRAÇAGE DES COURBES ET ENREGISTREMENT SUR DISQUE DUR.....	38
2.4.1	<i>Application exécutable</i> .....	38
2.4.2	<i>Traçage de la courbe</i> .....	39
2.4.3	<i>Enregistrement sur disque dur</i> .....	39
<b>CHAPITRE 3. RÉSULTATS À L'ISSU DES EXPÉRIMENTATIONS ET INTERPRÉTATIONS .....</b>		<b>41</b>
3.1	SYSTÈME D'ACQUISITION AUTOMATIQUE DE TENSION ET DU COURANT.....	41
3.2	ESSAI EN CHARGE DU SYSTÈME.....	41
3.2.1	<i>Intensité efficace</i> .....	41
3.2.2	<i>Tension efficace</i> .....	43
3.2.3	<i>Puissance apparente</i> .....	43
3.2.4	<i>Puissance active</i> .....	44
3.2.5	<i>Facteur de puissance</i> .....	45
3.2.6	<i>Énergie</i> .....	46
3.3	ENREGISTREMENT DES DONNÉES .....	47
3.4	COMPARAISON DE CE SYSTÈME AVEC LE SYSTÈME D'ACQUISITION DE DONNÉES DE LA MCH DE TOLONGOINA .....	47
<b>CONCLUSION .....</b>		<b>48</b>
<b>RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES .....</b>		<b>50</b>
<b>ANNEXES .....</b>		<b>51</b>

# NOMENCLATURE

<b>Symbole</b>	<b>Définition</b>	<b>Unités</b>
$\text{Cos}(\varphi)$	: Facteur de Puissance	-
$E$	: Énergie	kWh
$E_r$	: Erreur	
$f$	: fréquence	Hz
$i(t)$	: Intensité instantanée	A
$I_{\text{eff}}$	: Intensité efficace	A
$P$	: Puissance Active	W
$p(t)$	: puissance instantanée	W
$P_{\text{moy}}$	: Puissance moyenne	W
$Q$	: Puissance Réactive	VAR
$q$	: Charge en Coulombs	C
$R_{\text{sh}}$	: Résistance shunt	$\Omega$
$S$	: Puissance Apparente	VA
$T$	: Période	s
$u(i)$	: Tension instantanée	V
$U_{\text{eff}}$	: Tension efficace	V

# LISTE DES ACRONYMES et ABREVIATIONS

A.C : Alternative Current

AIDER : Association des Ingénieurs pour le Développement des Énergies  
Renouvelables

B.T : Basse tension

CAN : Conversion Analogique Numérique

CAO : Conception Assistée par Ordinateur.

CCNUCC : Convention-cadre des Nations unies sur les changements climatiques

EEPROM: Electrically Erasable Programmable Read Only Memory

GES : Gaz à effet de serre

IDE: Integrated Development Environment

LED: Light Emitting Diode ou Dio

LTTC : Laboratoire Thermique, Thermodynamique et Combustion

M.T. : Moyenne Tension

PCB: Printed Circuit Board (Circuit Imprimé)

PCH : Pico-centrale Hydroélectrique

PHEDER : Pico HydroÉlectricité au service du DEveloppement Rural

S.A.A.I.T. : Système d'Acquisition Automatique d'Intensité et de Tension

SRAM: Static Random Access Memory

TI : Transformateur d'Intensité

TT : Transformateur de Tension

USB: Universal Serial Bus

VSPE : Virtual Serial Ports Emulator (Émulateur Virtuel de Ports Séries)

# LISTE DES ANNEXES

<b><u>ANNEXE 1</u></b> : Organigramme pour le calcul des valeurs efficaces .....	50
<b><u>ANNEXE 2</u></b> : Contenu du fichier d'enregistrement.....	51
<b><u>ANNEXE 3</u></b> : Affichage des courbes sur l'interface du logiciel S.A.A.I.T.....	52
<b><u>ANNEXE 4</u></b> : Les dossiers et fichiers automatiquement enregistrés par le système. De gauche vers la droite : ils sont sous la forme de dossier, fichier image et fichier Excel ...	53
<b><u>ANNEXE 5</u></b> : Organigramme du programme Arduino.....	54
<b><u>ANNEXE 6</u></b> : Organigramme du programme Processing .....	55

# LISTE DES FIGURES

Figure 1 : Sites du projet PHEDER .....	3
Figure 2 : Intensités et tensions par phase .....	9
Figure 3 : Électrodynamomètre Wattmètre .....	10
Figure 4 : Wattmètre Digital .....	11
Figure 5 : Arduino Software (IDE) .....	12
Figure 6 : Différentes parties d'un programme Arduino .....	13
Figure 7 : Vue de dessus et vue de dessous de la carte Arduino Nano.....	14
Figure 8 : Aperçu de l'environnement de programmation Processing.....	15
Figure 9 : ISIS Professionnel 7 .....	16
Figure 10 : ARES Professionnel .....	16
Figure 11 : Virtual Serial Ports Emulator (VSPE).....	17
Figure 12 : Transformateur d'intensité MSQ-30 .....	18
Figure 13 : Principe de fonctionnement d'un TI.....	18
Figure 14 : Conséquence de l'ouverture du secondaire d'un TI .....	19
Figure 15 : Schéma synoptique de l'acquisition automatique du courant et de la tension .....	21
Figure 16 : Schéma électrique du système.....	22
Figure 17 : Simulation du TT sous ISIS Proteus .....	23
Figure 18 : Conversion de l'intensité délivrée par le TI en une tension .....	25
Figure 19 : Graphe de la tension aux bornes du secondaire d'un TI sans $R_{sh}$ (à gauche) et les charges (à droite).....	26

Figure 20 : Tension aux bornes d'un TI court-circuité par une Rsh .....	27
Figure 21 : Carte de conditionnement pour le TT .....	28
Figure 22 : Simulation sous ISIS proteus de la carte de conditionnement pour le TT .....	29
Figure 23 : Oscillogramme à la sortie de la carte de conditionnement du TT .....	29
Figure 24 : Carte de conditionnement pour le TI .....	30
Figure 25 : Simulation sous ISIS proteus de la carte de conditionnement pour le TI.....	30
Figure 26 : Oscillogramme à la sortie de la carte de conditionnement du TI .....	31
Figure 27 : Recherche de la valeur de la polarisation .....	33
Figure 28 : Valeur filtrée du signale.....	33
Figure 29 : Autotransformateur pour l'étalonnage de la tension .....	34
Figure 30 : Interface de l'application .....	39
Figure 31 : Fichier d'enregistrement.....	40
Figure 32 : Système d'acquisition automatique de tension et de courant .....	41
Figure 33 : A gauche, oscillogramme du capteur de tension. À droite, la polarisation inverse du TI.....	45
Figure 34 : Résultat du test de l'énergie consommée .....	46

# LISTE DES TABLEAUX

Tableau 1 : Caractéristique de l'Arduino nano 3.x .....	13
Tableau 2 : Caractéristique des capteurs de courant .....	24
Tableau 3 : Changement d'angle en fonction de la tension .....	36
Tableau 4 : Changement d'angle en fonction de l'intensité .....	37
Tableau 5 : Configuration requise par l'application .....	38
Tableau 6 : Première comparaison de la valeur de l'ampèremètre et le S.A.A.I.T. ....	42
Tableau 7 : Comparaison après correction de l'erreur .....	42
Tableau 8 : Valeurs de l'intensité avec différentes charges .....	43
Tableau 9 : Comparaison de la tension à la sortie d'un autotransformateur et celle mesurée par le système d'acquisition .....	43
Tableau 10 : Puissance apparente .....	44
Tableau 11 : Valeurs de la puissance apparente en fonction de la charge .....	44
Tableau 12 : Valeurs de la puissance active .....	45
Tableau 13 : Valeurs du facteur de puissance .....	45

# INTRODUCTION

Les énergies renouvelables figurent parmi les 200 types de projets identifiés par le mécanisme de développement propre (MDP) comme étant un mécanisme de compensation des émissions de carbone. Lancé officiellement en 2012, la fondation Tany Meva et l'Union Européenne cofinancent le projet PHEDER ou Pico HydroÉlectricité au service du Développement Rural. Avec ce projet, ces financeurs envisagent de vendre le crédit carbone de leurs PCH ou Pico-centrale Hydroélectriques. Pour ce faire, il est impératif d'avoir, à tout instant du fonctionnement de ces infrastructures de production électrique, l'enregistrement de la valeur exacte de l'énergie produite en kWh. Sur les sites, la transcription des valeurs est faite manuellement par les agents de quarts. Comment pourrait-on savoir si les valeurs prises en note sont exactes ou si ces agents ne trichent pas en replissant en avance les cahiers ? Existe-t-il un moyen pour que les données caractérisant le fonctionnement de ces centrales soient reçues automatiquement sous forme de graphe et/ou de fichier numérique ? Les recherches et les études effectuées durant notre stage au sein du projet PHEDER ont permises de proposer une solution à ces problèmes en faisant une étude sur la mesure et l'enregistrement automatique des valeurs caractéristiques d'une PCH ou MCH.

La mesure de la tension et du courant industriels ne se fait pas à la légère. Pour avoir une valeur exacte de l'énergie, il faut avoir une précision et exactitude sur la valeur de la puissance active. Cette dernière nous oblige à faire des échantillonnages des valeurs instantanées de l'intensité et de la tension. Nous avons donc pris l'initiative de faire une « **conception et réalisation d'un système d'acquisition automatique de tension et de courant** ». Avoir choisi ce sujet a été une occasion opportune pour nous notamment sur les plans expérimentaux, relationnels et acquisition de nouvelles connaissances. À part le marché du carbone, ce projet est une innovation sur la numérisation des données des pico ou microcentrales hydroélectriques.

En apportant un rapport qualité prix et face aux problèmes des sociétés, ce projet vise à concevoir une solution sur l'acquisition des données. D'une part, cela permettra d'avoir des données exploitables sous forme de courbe et de fichier numérique. Ces valeurs et ces graphes feront l'objet d'une étude afin de pouvoir vendre le crédit carbone. D'autre part, ce système facilitera la compréhension des anomalies sur le fonctionnement globale de la centrale. Le système est conçu en laboratoire et est testé avec des charges connues. Les résultats sont



comparés avec les calculs et d'autres appareils de mesure. Ces résultats sont ramenés périodiquement sous forme de rapport vers la société avec une démonstration pratique.

Ce système fait l'acquisition automatique de la tension et du courant et il affiche sur l'écran d'un ordinateur des courbes de la puissance active, de l'intensité efficace produite et de l'énergie consommée. Toutes les données sont affichées sur l'écran en chiffre et sont enregistrées sur le disque dur sous format Excel. L'interface du logiciel d'enregistrement et d'affichage est personnalisable selon le besoin de la société utilisatrice. Nous avons effectué notre stage au sein du projet PHEDER. Dans le cadre du dit projet, et en collaboration avec l'union Européenne, la fondation Tany Meva fait partie du bailleur de fond pour la mise en place des PCH grâce aux programmes « Energy Facility II » et « Angovo Meva ». Nous avons également travaillé au sein du laboratoire LTTC pour effectuer nos recherches et essais.

Pour avoir plus de compréhension sur ce manuscrit,

D'abord, nous verrons les généralités et les éléments bibliographiques. Ensuite, après avoir étudié les méthodes de conceptions et de réalisation d'un système d'acquisition automatique de tension et de courant, nous analyserons les résultats à l'issu des expériences et ses interprétations.

# Chapitre 1. GÉNÉRALITÉS

## 1.1 Projet PHEDER

PHEDER ou Pico HydroÉlectricité au service du DÉveloppement Rural est un projet d'électrification rurale. Il est cofinancé par l'Union Européenne et la fondation Tany Meva.

Ce projet a pour objectif de desservir 77.000 personnes en électricité. Ces bénéficiaires directs sont répartis dans six communes du district d'Ambositra et d'Anjozorobe. En ce qui concerne le prix de l'électricité, le projet envisage de l'offrir de façon abordable. Le projet est géré par Mr Tantely Rakotoarimanana[4]. Les permissionnaires de ce projet sont :

- SRAFI : société gérant la PCH de Kianja et d'Andina. Elle est contrôlée par la SMAI ;
- AIDER : une association responsable de la PCH d'Amboasary ;
- BEPC NANALA : elle assure le fonctionnement de la PCH d'Ambatomanoïna.

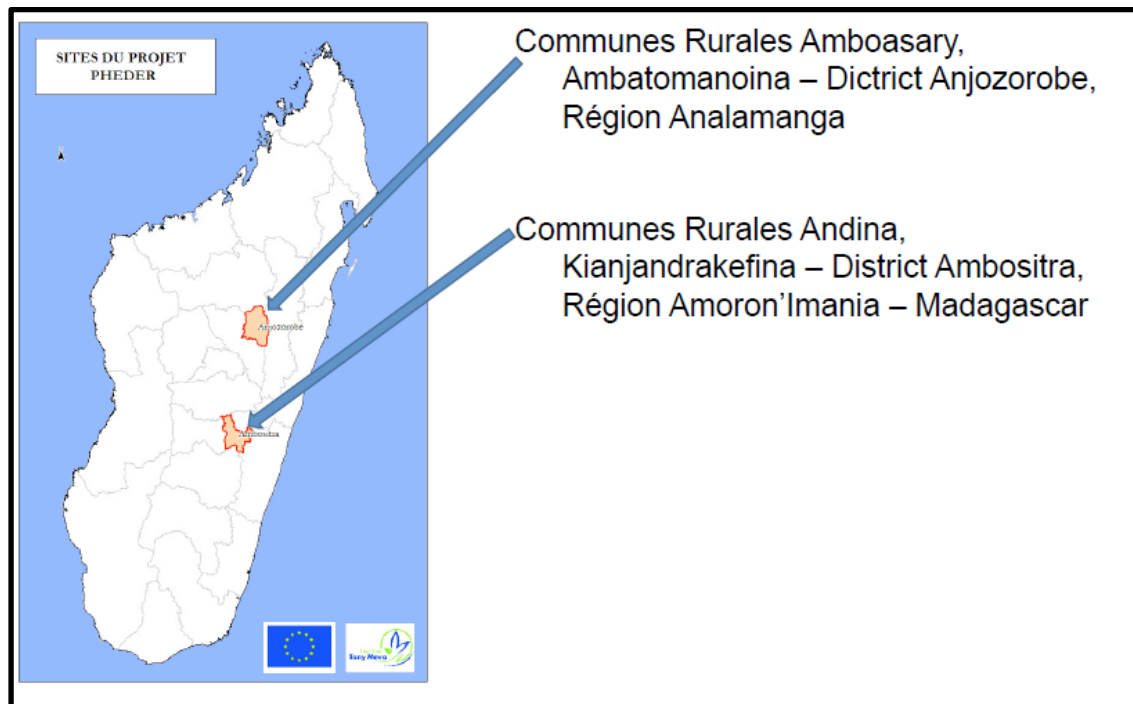


Figure 1 : Sites du projet PHEDER [3]

Ce projet a été élaboré afin de contribuer au programme gouvernemental pour l'électrification rurale.

## 1.2 Contexte du stage

Pour notre stage, le Gestionnaire du projet PHEDER nous a confiés une mission en vue de répondre au besoin des permissionnaires. Dans l'optique de la vente des crédits carbone, la fondation voudrais avoir plus de précision sur l'énergie produite par ses PCH. De ce fait, elle

nous a demandés de lancer une étude en vue de répondre à ses besoins et de faire des recherches pour résoudre ce problème. La société veut que :

- le suivi des puissances et de l'énergie ne réside plus sur une approximation de l'agent de quart ;
- les données ne soient plus manuscrite mais plus tôt sous forme de fichier. De cette façon, les contrôleurs internationaux feront tout simplement du copier-coller des fichiers contenant les données annuelles au lieu de refaire une saisie kilométrique ;
- les PCH faisant partie du projet PHEDER auront des données fiables, précises et faciles à manipuler (c'est-à-dire des données sous forme numérique).

La société nous a mis à la disposition tous les outils nécessaires pour trouver une proposition de solution à ses problèmes. On nous a donné toute l'opportunité de faire des recherches relatives à la résolution des contraintes que la société fait face. De plus, nous avons effectué notre expérimentation au sein du LTTC pour que les solutions proposées soient fiables.

Notre stage consistait aussi à faire des rapports tous les deux semaines pour rendre compte de l'avancement de nos recherches. Ce rapport est destiné en premier lieu à notre encadreur professionnel. En second lieu, nous sommes aussi demandés de faire un rapport sous forme de présentation orale aux permissionnaires du projet PHEDER.

### **1.3 Problème des permissionnaires**

Il est à rappeler que la société a besoin d'avoir une valeur exacte en ce qui concerne le fonctionnement des pico ou microcentrales hydroélectriques collaborant avec Tany Meva. Cela est afin de pouvoir faire l'équivalence en tonne de carbone de l'énergie en kWh pour la vente du crédit carbone.

Or, l'enregistrement des données se fait manuellement par l'agent de quart. Cela crée une énorme incertitude car l'agent prend note de façon approximative les valeurs des données sur le tableau électronique. D'un autre côté, la prise de note dans le temps n'est pas 100% assurée parce qu'il faut avoir les valeurs 24 heures sur 24 heures. Durant une réunion avec les responsables des PCH, un ancien Directeur de la JIRAMA a même mentionné qu'au moment de sa visite inopinée à la centrale à 22h, le cahier d'enregistrement a été déjà remplis jusqu'à 6h du matin. L'exactitude de ces données réside donc sur l'honnêteté des agents.

Avec un cahier et un stylo pour enregistrer les données, Tany Meva aura une tâche de plus à faire pour les ressaisir et faire le traçage des courbes sous Excel.

## 1.4 Déroulement du stage

Nous avons fait des recherches afin de pouvoir résoudre les problèmes de la société. Il nous fallait faire des inventaires de toutes les solutions possibles adaptées à la circonstance. Puis, après avoir mis en évidence une solution appropriée, il est primordial d'identifier et d'apprendre les outils adéquats pour le succès de notre mission. En effet, la plus part des outils (logiciels et matériels) sont très nouveaux pour nous.

Suite aux recherches et aux études réalisées, nous avons proposé notre projet personnel qui répond parfaitement aux besoins de la société. Ce projet est également une solution au problème des sociétés. Durant cette recherche de solution, nous avons visité une PCH pour voir de près ses fonctionnements. Nous y avons étudié aussi comment se fait leur enregistrement de données. Nous avons également visité la MCH de Tolongoina qui possède un système permettant de faire une acquisition automatique de données.

Nous avons donc proposé au Gestionnaire du projet PHEDER de mettre en œuvre une version améliorée du système d'acquisition de données. Nous avons lancé l'étude sur le circuit électronique et la programmation informatique et électronique. C'est aussi la partie de la simulation et de sélection des capteurs.

Notre proposition fait partie de la résolution du problème de la société notamment au niveau des pico-centrales et microcentrales hydroélectriques. Il apporte une précision sur les puissances et l'automatisation de l'enregistrement des données. Nous avons, de ce fait, participé à une réunion des sociétés du projet PHEDER durant laquelle nous avons pris la parole pendant de plus de 15 minutes. Nous avons exposé aux permissionnaires notre système et puis nous avons répondu aux multitudes questions des directeurs et représentants des sociétés. Les sociétés participantes de cette réunion sont :

- la fondation Tany Meva ;
- ADER ;
- AIDER ;
- SRAFI (PCH de Kianjandraniakatra et Andrina) ;
- BEPC NANALA ( Ambatomanohina).

Suite à notre stage, nous avons utilisé les données obtenues grâce à nos études et nos recherches pour faire la réalisation pratique de notre projet personnel. Cette réalisation a été financée entièrement par le LTTC.

Nous verrons par la suite les notions nécessaires à la compréhension de notre réalisation.

## **1.5 Mécanisme de compensation d'émission de carbone**

Actuellement, les pays industrialisés émettent de façon excessive les GES ou Gaz à Effet de Serre. Les principaux GES sont :

- le dioxyde de carbone (CO<sub>2</sub>) ;
- le méthane (CH<sub>4</sub>) ;
- et les gaz toxiques comme : l'oxyde d'azote (NO<sub>x</sub>), l'anhydride sulfureux (SO<sub>2</sub>), l'ozone (O<sub>3</sub>) et les chlorofluorocarbones (CFC-11 et CFC-12).

Le système de crédit quantifie ces émissions où un crédit-carbone correspond à une tonne d'équivalent CO<sub>2</sub>.

Pour l'application de la Convention-cadre des Nations unies sur les changements climatiques (CCNUCC) de Rio de 1992, le protocole de Kyoto en 1997 a été mis en vigueur depuis 2005. Il a comme objectif de faire une quantification et limitation de l'émission des GES par les Pays figurant dans l'annexe B de ce protocole.

Les Pays émetteurs de GES ont trois alternatives à savoir :

- la diminution de ses émissions ;
- l'achat de quotas d'émissions ;
- et l'investissement au pays pauvres pour réduire les émissions de GES.

L'achat de quotas et l'investissement ont favorisé le marché du carbone. Dans ce marché, il y a des échanges de quotas d'émission de GES.

Une définition de limite d'émission ou l'allocation de quota est fait préalablement. Puis, le protocole de Kyoto oblige les Pays concernés à ne pas dépasser ses limites d'émissions. Les Pays qui n'arrivent pas à respecter ses limites sont obligés à acheter du crédit carbone aux autres Pays non émetteurs de carbone.

## **1.6 PUISSANCE ÉLECTRIQUE ET MESURE DE LA PUISSANCE**

### **1.6.1 Généralités sur la puissance**

La puissance électrique est l'énergie électrique échangée entre les charges électriques et le générateur par unité de temps. Son unité est le Watt [W] ou Joule par seconde [J/s]. En courant continu et en courant alternatif ayant une charge purement résistif, elle est le produit du courant et de la tension. Par contre, pour un courant alternatif avec lequel on associe une charge pouvant être inductive ou capacitive, le produit de la valeur efficace du courant et de la tension donne la puissance apparente  $S$ . Cette dernière a comme unité Volt Ampère [VA].

La différence de potentiel entre deux points est égale à l'énergie par unité de charge (Joules/Coulomb) qui est nécessaire pour déplacer la charge électrique entre ces deux points.

La puissance électrique est donnée par le produit de la tension U et du courant I (en Joules/seconde=Watt)

$$P = \frac{qU}{t} = UI \quad 1.5.1$$

avec :

- q : Charge en Coulomb
- t : temps
- I : le courant électrique
- U : la tension

#### a. En courant continu :

En courant continu, en cas de charge résistive, la loi de Joule peut être combinée avec la loi d'Ohm pour produire l'expression de la puissance dissipée.

D'après la loi de Joule, nous avons :

$$P = I^2 R \quad 1.5.1.a1$$

Et la loi d'Ohm nous donne :

$$U = I R$$

$$\Rightarrow I = \frac{U}{R} \quad 1.5.1.a2$$

(3) -> (2) =>

$$P = \frac{U^2}{R}$$

#### b. En courant alternatif monophasé :

En alternatif, il existe trois formes de puissances à savoir :

- la puissance apparente : cette puissance est le produit de la tension efficace avec l'intensité efficace ou bien le demi du produit de la tension maximale avec l'intensité maximale:

$$S = U_{eff} \cdot I_{eff} = \frac{V_{max} \cdot I_{max}}{2} \quad 1.5.1.b1$$

avec :

- S : Puissance apparente
- U<sub>eff</sub> : Tension efficace

- $I_{eff}$  : Intensité efficace
- $V_{max}$  : Tension maximale
- $I_{max}$  : Intensité maximale

- la puissance active : c'est la puissance moyenne sur un cycle complet sinusoïdal du produit de la tension instantanée et du courant instantané. Elle constitue la puissance réellement consommée par une charge. Elle a comme formule mathématique :

$$P = \frac{1}{T} \int u(t) \cdot i(t) dt = U_{eff} \cdot I_{eff} \cdot \cos(\varphi) = \langle u(t) \cdot i(t) \rangle \quad 1.5.1.b2$$

avec :

- $P$  : puissance active
- $T$  : période
- $u(t)$  et  $i(t)$  : respectivement la tension instantanée et le courant instantané
- $\varphi$  : le déphasage entre le courant et la tension

Une formule discrète permet d'avoir la même puissance active que l'équation 1.5.1.b2

$$P = \frac{1}{N} \sum_{n=0}^{n-1} u(n) \cdot i(n) \quad 1.5.1.b3$$

avec :

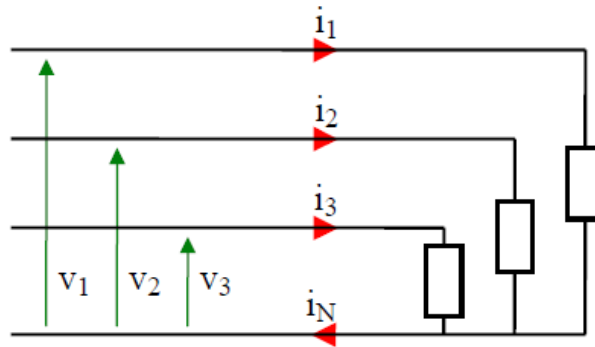
- $u(n)$  : échantillonnage instantané de  $u(t)$
- $i(n)$  : échantillonnage instantané de  $i(t)$
- $N$  : nombre d'échantillonnage

- et la puissance réactive : La puissance réactive se définit comme le produit de la puissance apparente avec sinus phi :

$$Q = U_{eff} \cdot I_{eff} \cdot \sin(\varphi) \quad 1.5.1.b4$$

### c. Puissance dans une ligne triphasée

- Cas général d'une puissance active :



**Figure 2 : Intensités et tensions par phase**

D'après la loi de la conservation de l'énergie, la puissance instantanée totale consommée par la charge est la somme des puissances instantanées consommées par chaque élément.

$$p(t) = v_1(t)i_1(t) + v_2(t)i_2(t) + v_3(t)i_3(t) \quad 1.5.1.c1$$

Pour les signaux de même période, la valeur moyenne de la somme est la somme des valeurs moyennes. De ce fait, la puissance active ou la puissance moyenne transportée par une ligne triphasée a comme relation générale :

$$P = \langle v_1(t)i_1(t) \rangle + \langle v_2(t)i_2(t) \rangle + \langle v_3(t)i_3(t) \rangle \quad 1.5.1.c2$$

#### d. Facteur de puissance

Le facteur de puissance est le rapport entre la puissance active et la puissance apparente. C'est la mesure pratique de l'efficacité d'un système de distribution d'énergie.

$$\cos(\varphi) = \frac{P}{S} \quad 1.5.1.d$$

avec :

$\cos(\varphi)$  : facteur de puissance

$\varphi$  : angle de déphasage entre le courant et la tension

Pour deux systèmes transmettant une même valeur de puissance active, ce qui a un faible facteur de puissance aura une circulation de courant beaucoup plus élevée à cause de la puissance retournée vers la source depuis la charge. Cela engendre une perte et réduit l'efficacité générale de transmission d'énergie. Un circuit ayant un facteur de puissance faible aura une puissance apparente élevée et une grande perte pour une même valeur de puissance active.

#### e. Énergie

L'énergie est la puissance multipliée par le temps :



Nous avons

$$E = P \cdot t \quad 1.5.1.e$$

avec  $P$  : puissance pendant l'intervalle de temps  $t$

En utilisant la formule discrète de la puissance active  $P$ , le temps  $t$  considéré est le temps d'échantillonnage de  $u(n)$  et de  $i(n)$ .

## 1.7 Mesure de la puissance

La mesure de la puissance est effectuée tant en circuit alternatif qu'en circuit continu. Il existe deux façons pour mesurer une puissance à savoir :

- en utilisant un équipement de mesure ;
- ou en faisant une acquisition automatique de la tension et du courant avec un microcontrôleur (Arduino) et un logiciel pour afficher les résultats. [2]

### 1.7.1 Utilisation d'un équipement de mesure

Pour la puissance en courant continu, elle se mesure grâce à un voltmètre et un ampèremètre. Elle peut être mesurée directement grâce à un Wattmètre. Deux instruments différents peuvent être utilisés à savoir :

- un dynamomètre pour un circuit continu ou alternatif ;

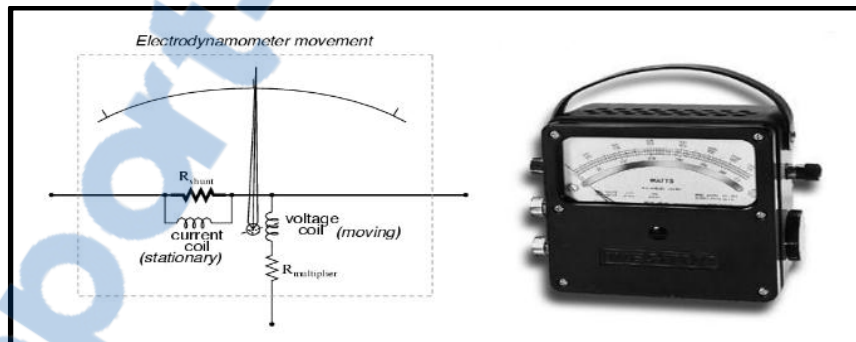


Figure 3 : Électrodynamomètre Wattmètre [2]

- un Wattmètre digital, il fait mille fois d'échantillonnages par seconde avec lesquels la tension est multipliée par l'intensité pour un même instant  $t$ . La moyenne de cette multiplication durant un cycle représente la puissance active. Les valeurs échantillonnées sont utilisées pour calculer les valeurs efficaces ( $I_{eff}$  et  $U_{eff}$ ), la puissance apparente, le facteur de puissance et l'énergie en kWh.



**Figure 4 : Wattmètre Digital [2]**

Dans le cas où le facteur de puissance et la puissance apparente sont connus, le calcul de la puissance active et la puissance réactive se fait grâce au triangle de puissance.

### **1.8 Acquisition automatique de donnée**

La puissance pourrait être mesurée en utilisant un appareil électronique spécialement conçu pour effectuer une acquisition automatique de la tension et de l'intensité. Les valeurs analogiques ainsi captées sont converties en données numériques qu'un microcontrôleur peut facilement traiter. Puis les valeurs sont ensuite transférées vers un ordinateur pour y être affichées et stockées sous forme de fichier Excel ou image.

Pour avoir plus de compréhension sur le chapitre suivant, nous allons voir par la suite des notions générales sur quelques matériels et logiciels utilisés dans ce projet.

#### **1.8.1 Arduino**

C'est une plateforme de prototypage « open-source » avec laquelle l'utilisation du matériel et du logiciel est facile. Les cartes Arduino sont capables de faire une lecture des entrées telles que la lumière sur un capteur de luminosité, le doigt sur un bouton lorsque nous appuyons dessus ou les messages électroniques. Ces cartes transforment ensuite ces entrées en une ou plusieurs sorties comme l'activation d'un moteur, le clignotement d'une « LED » voire la publication du résultat en ligne. [5]

La carte Arduino peut faire une action en y téléchargeant un ensemble d'instructions. Pour ce faire, nous utilisons le langage de programmation **Arduino** et l'**Arduino Software (IDE)**, basé sur le traitement.

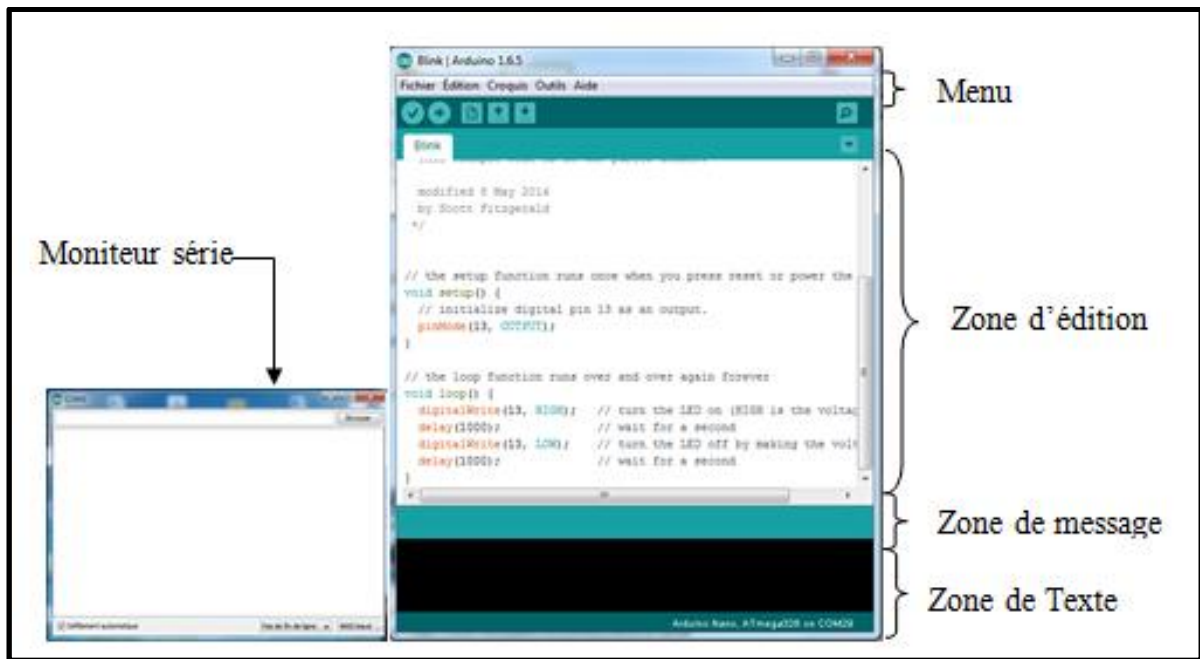


Figure 5 : Arduino Software (IDE)

Il y a pas moins de 20 types de carte Arduino mais les plus utilisés sont :

- Arduino mini ;
- Arduino nano ;
- Arduino Uno ;
- Arduino Mega ;
- Arduino Duemilanove...

#### a. Arduino IDE

L'Arduino IDE que nous avons utilisé pour ce projet est la version 1.6.5. On y fait la conception et la compilation du programme avec le langage Arduino. L'IDE sert également comme logiciel pour téléverser le programme compilé vers la carte Arduino. Cela se fait grâce au câble USB mini. Les instructions en langage Arduino s'exécutent d'une façon séquentielle c'est-à-dire les unes après les autres. Le programme Arduino est principalement divisé en trois parties :

- une partie déclarative ;
- une partie d'initialisation et de configuration des entrées et sorties : la fonction *setup ()* ;
- et une partie principale qui s'exécute en boucle : la fonction *loop ()*.

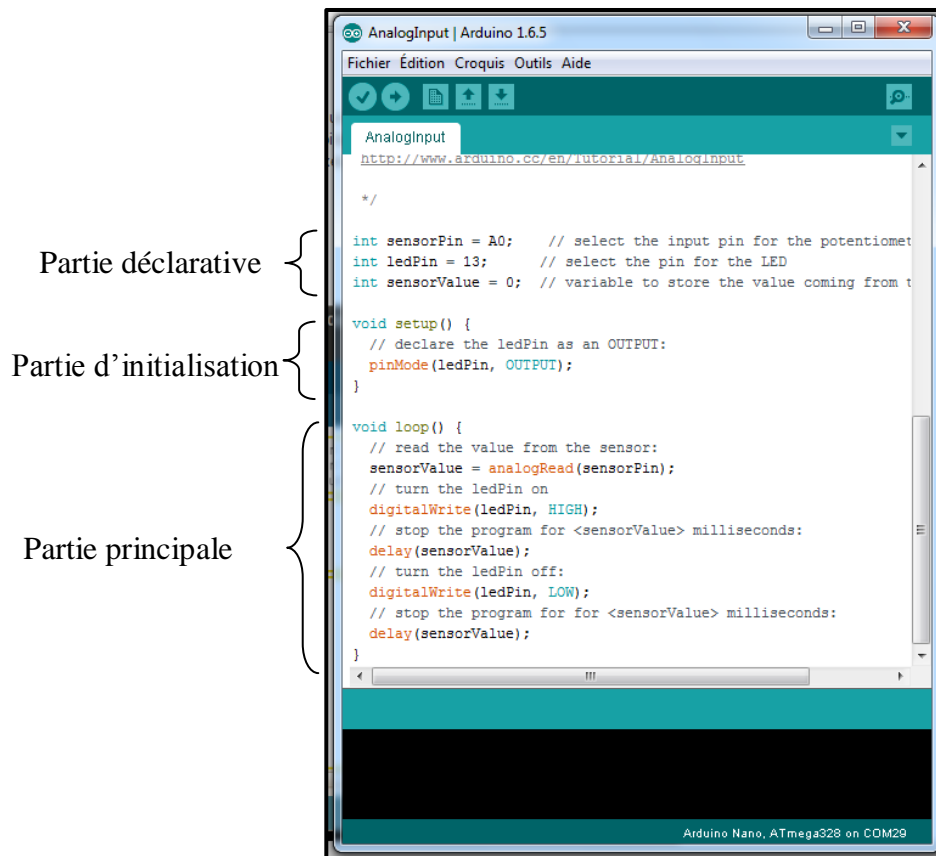


Figure 6 : Différentes parties d'un programme Arduino

## b. Carte Arduino Nano

La carte Arduino que nous avons utilisée dans ce projet est l'Arduino nano 3.x. Elle fonctionne avec un microcontrôleur programmable ATmega328. Le Tableau 1 résume ses caractéristiques :

Tableau 1 : Caractéristique de l'Arduino nano 3.x [5]

Microcontrôleur	ATmega328
Tension d'alimentation (recommandée)	7-12 V
Tension d'alimentation (limites)	6-20 V
Pins d'entrée/sortie numérique	14 (of which 6 provide PWM output)
Pins d'entrée analogique	8
Intensité par Pin entrée/sortie	40 mA
Mémoire Flash	32 ko avec laquelle 2 ko utilisée par le "bootloader"
SRAM	2 ko
EEPROM	1 ko
Vitesse de l'horloge	16 MHz
Dimensions	0.73" x 1.70"
Longueur	45 mm
Largeur	18 mm
poids	5 g

L'avantage d'utiliser ce type de carte demeure entre autre dans l'économie d'espace qu'elle nous offre grâce à ses dimensions. Et même si elle occupe une surface beaucoup plus réduite par rapport à l'Arduino UNO par exemple, Arduino nano remplit toutes les fonctions nécessaires.

Son alimentation se fait de trois manières différentes :

- Soit via un câble USB Mini-B qui sert également de câble de transfert de données ;
- Soit grâce au pin 27 en y appliquant une tension continue régulée de 5V ;
- Soit grâce au pin 30 en y injectant une tension entre 6 et 20V.

Tous les 14 pins d'entrée-sortie numérique peuvent être configurés comme entrée-sortie en utilisant les fonctions :

- `pinMode ()` ;
- `digitalWrite ()` ;
- et `digitalRead ()`.

Ces pins fonctionnent sous une tension de 5V et un maximum de courant de 40mA. Ils ont également une résistance pull-up entre 20 à 50 kOhms chacun. Ces résistances sont par défaut déconnectées.

Des spécifications sont à noter pour quelques pins à savoir :

- 0 et 1 sont spécialisés sur la transmission et réception des données vers le port série ;
- 2 et 3 : peuvent être configurés comme déclencheurs d'interruption ;
- 3 jusqu'à 11 : pour la sortie PWM avec une résolution 8 octets ;
- 13 : pin connecté avec la diode LED interne ;
- A4 (SDA) et A5 (SCL) : pins pour la communication I<sup>2</sup>C et utilise la librairie interne « Wire » ;
- AREF. : pin pour la tension de référence pour les entrées analogiques utilisant la fonction « *analogReference ()* » ;
- Reset. : reset le microcontrôleur à l'état bas (0 numérique).

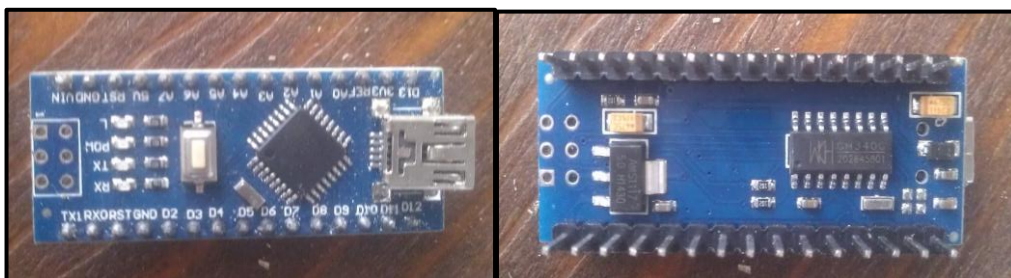


Figure 7 : Vue de dessus et vue de dessous de la carte Arduino Nano

## 1.8.2 Environnement de programmation Processing

Créé en 2001 par Benjamin Fry et Casey Reas, l'environnement de programmation "processing" est un éditeur simple et utilisable pour écrire et exécuter des programmes.

Le langage JAVA est la base de cet environnement. Ce langage a comme particularité d'être multiplateforme. De ce fait, il est possible de l'utiliser indifféremment que ce soit sur mac, pc ou linux. [6]

Il est possible de créer une interface pour afficher une courbe voire un logiciel (d'extension .exe) avec cet environnement. Pour créer un logiciel dit « stand alone » avec processing, il suffit de faire une exportation du programme compilé.

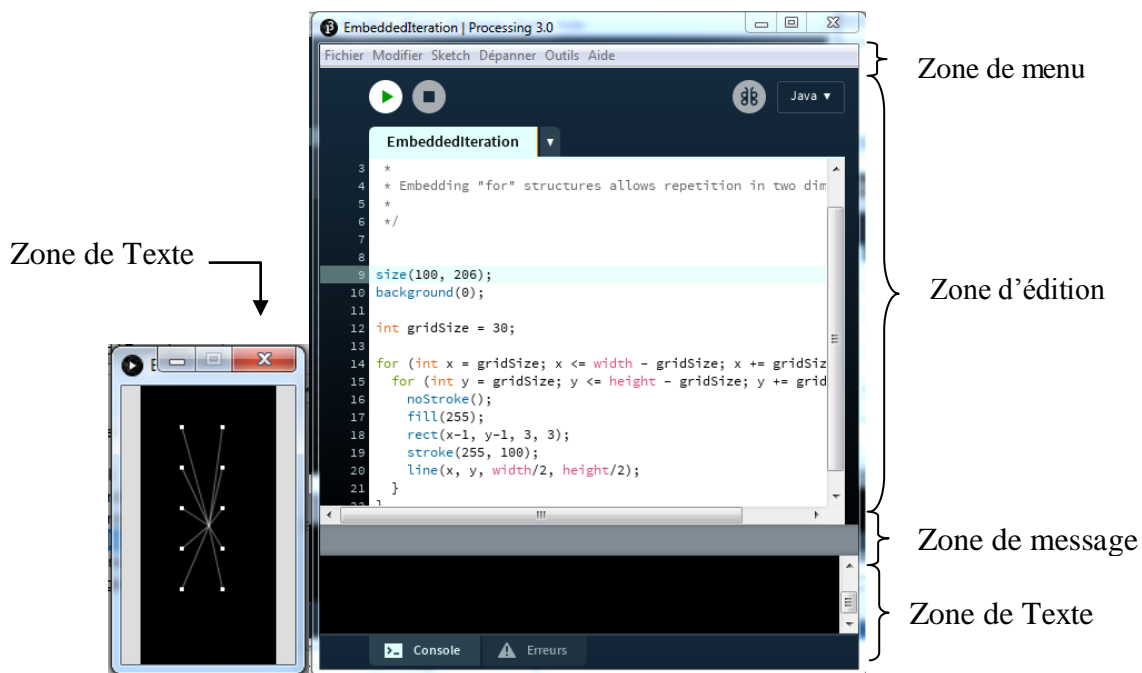


Figure 8 : Aperçu de l'environnement de programmation Processing

## 1.8.3 Logiciels de simulation

- Proteus (ISIS et ARES)

Proteus est un logiciel permettant de faire une simulation des composantes ou circuits électroniques sous Windows. Un logiciel développé par la société « Labcenter Electronics », il inclut des logiciels permettant de faire une CAO (ou Conception Assistée par Ordinateur) dans le domaine électronique.

Il nous offre une compréhension des comportements d'un composant électronique dans un circuit d'une façon numérique. Il réduit également les risques d'électrocution lors des tests d'un circuit électrique.

Le logiciel proteus est composé de deux logiciels principaux :

- ISIS : notamment réputé pour faire des éditions des schémas électriques, ce logiciel de proteus permet de simuler ces schémas de façon à ce que les erreurs durant la conception soient détectées. [7]

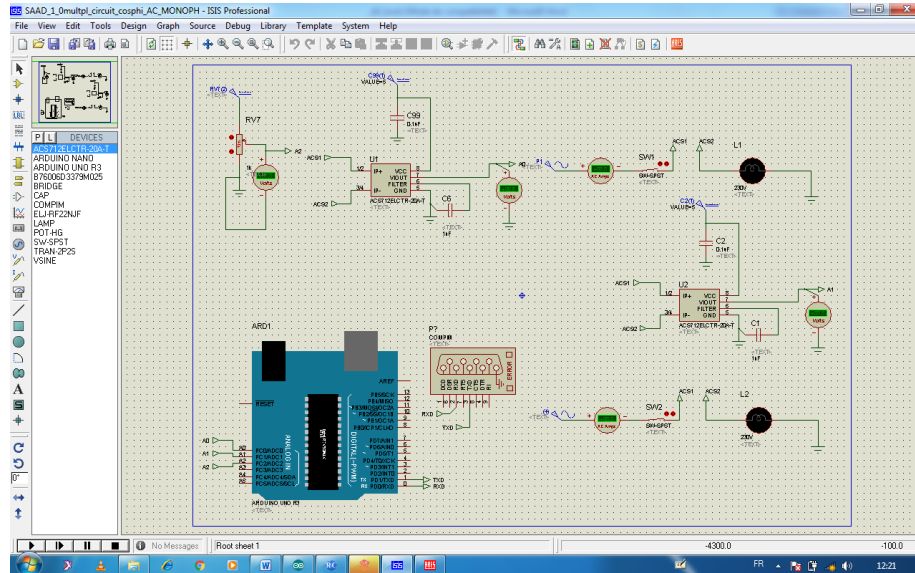


Figure 9 : ISIS Professionnel 7

- ARES : en parfaite complémentarité avec ISIS, c'est un outil d'édition et de routage. Après avoir fait la conception et la simulation sous ISIS d'un schéma électrique, nous pouvons facilement l'importer sur ARES pour l'étape suivante qui n'est autre que le circuit imprimé ou PCB. ARES exécute automatiquement l'emplacement des composants et le routage. [7]

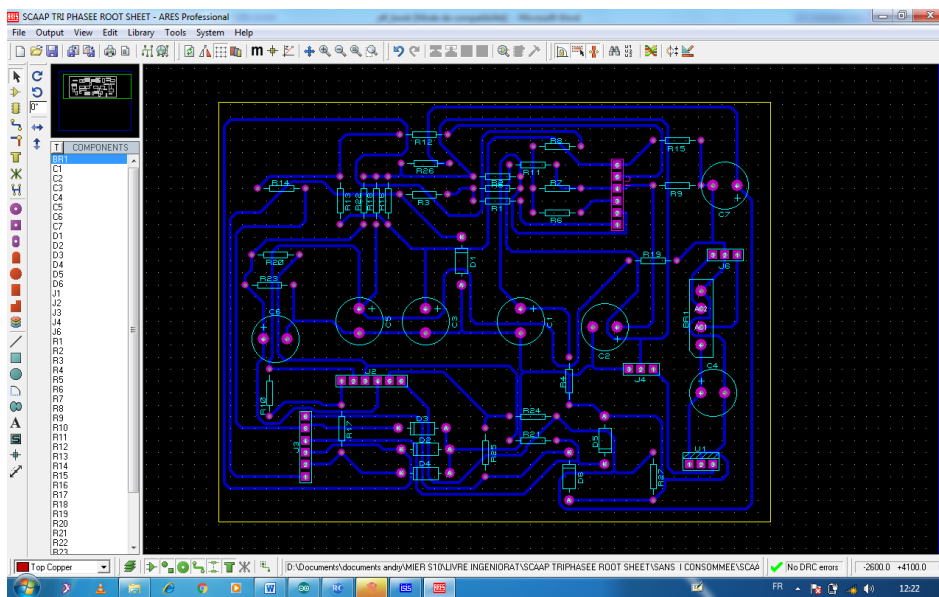


Figure 10 : ARES Professionnel

Nous avons effectué la CAO de notre circuit avec le logiciel ISIS Proteus version 7 Professionnel. Avec ce logiciel, nous avons pu comprendre le comportement de la carte Arduino ainsi que les capteurs de courant et de tension. Nous avons également eu l'opportunité d'y faire la simulation de la communication série entre l'Arduino et Processing grâce au logiciel VSPE.

Pour assurer le transfert de donnée depuis ISIS vers processing durant les simulations, nous avons eu recours à un émulateur. Ce dernier est le VSPE version 0.938.4.846.

#### - Virtual Serial Ports Emulator (VSPE) ou Emulateur Virtuel des Ports Séries [8]

VSPE est un logiciel qui aide les développeurs à faire des tests ou à déboguer une application utilisant des ports séries. Selon la configuration voulue, ce logiciel est capable de mettre à la disposition du programmeur pas mal de dispositifs virtuels pour recevoir et/ou transmettre des données.

L'avantage d'utiliser VSPE c'est que plusieurs applications peuvent utiliser plus d'une fois le port série virtuel. Il apparaît que les ports séries réels ne possèdent pas cette particularité avantageuse. Il est également possible de partager les données à plusieurs applications

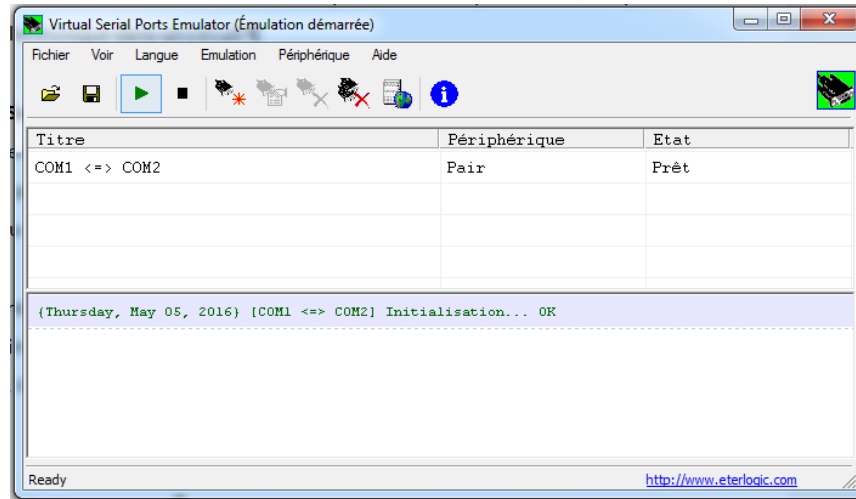


Figure 11 : Virtual Serial Ports Emulator (VSPE)

#### 1.8.4 Transformateur d'Intensité (TI)

Comme tout autre transformateur, un TI figure parmi les machines électriques. Un TI est utilisé dans le but de convertir les courants intenses d'une ligne MT ou BT en une tension de valeur mesurable. Il apporte notamment une isolation galvanique au circuit de mesure sécurisant ainsi les parties électronique et les microcontrôleurs.

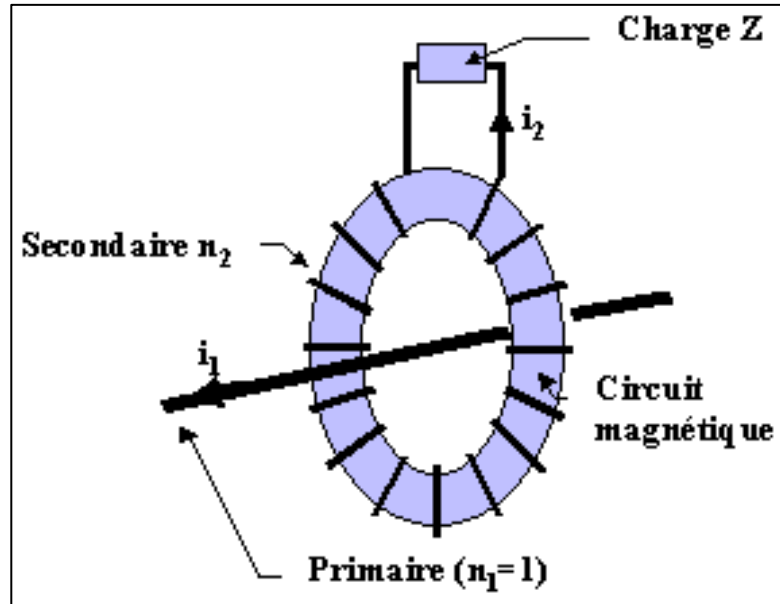




**Figure 12 : Transformateur d'intensité MSQ-30**

Puisqu'un TI est un transformateur, il possède donc une partie primaire et une partie secondaire. Le câble ou le fil conducteur servent comme partie primaire. Il entre dans le trou au centre du TI. Le secondaire est l'enroulement du fil recuit autour du TI. Le primaire d'un TI est monté en série avec le circuit à mesurer. Leur puissance est généralement comprise entre 5 à 200VA. Le secondaire délivre un courant nominal comprise entre 1 et 5A.

**a. Principe de fonctionnement d'un TI**



Source : <http://sitelec.org/>

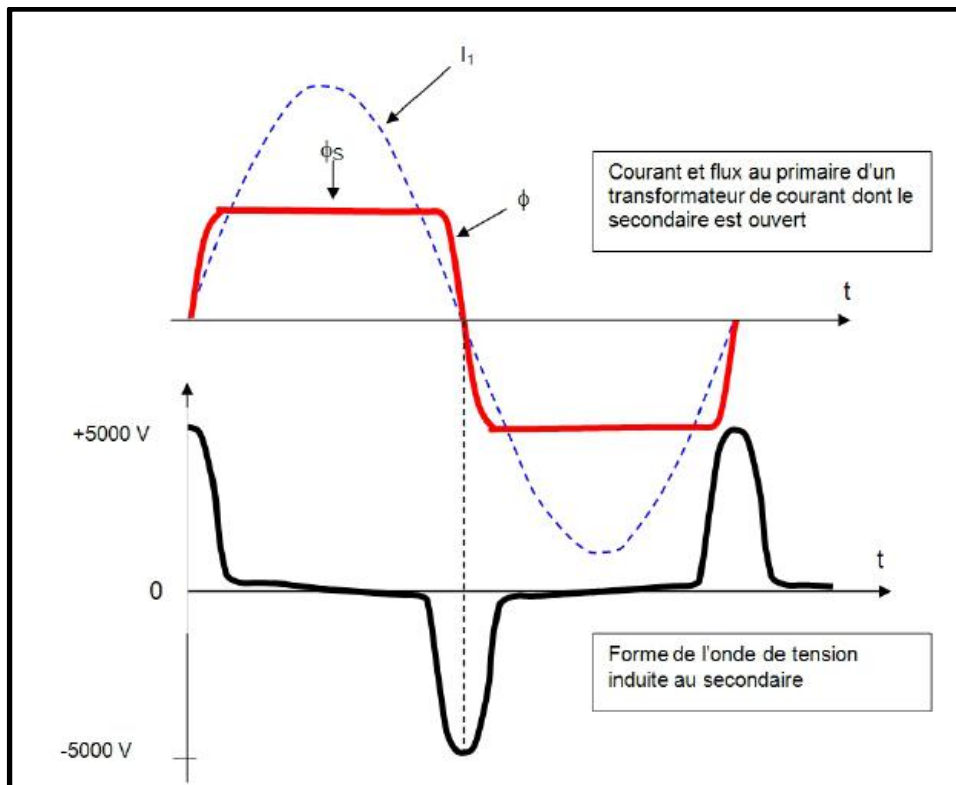
**Figure 13 : Principe de fonctionnement d'un TI**

Le primaire a  $n_1$  spires et parcouru par un courant  $i_1$ . Le secondaire débite un courant  $i_2$  dans une charge  $Z$ . La variation du flux magnétique créée par  $i_1$  engendre une tension induite dans le secondaire.

## b. Montage

Pour le montage, il est impératif de court-circuiter le secondaire du TI quand un courant circule dans le primaire. En effet, le courant du primaire ne dépend que de la charge et non pas de l'état du secondaire. Si le secondaire est ouvert alors que du courant circule dans le primaire, le secondaire ne compense plus les ampères-tours du primaire. Cela engendre une saturation du circuit magnétique. [1]

La figure suivante nous apporte beaucoup plus d'explication sur le danger que nous expose cette saturation du circuit magnétique.



Source : *Machine électrique cours et problèmes*, p31

**Figure 14 : Conséquence de l'ouverture du secondaire d'un TI**

La Figure 14 nous montre une alternance positive et une alternance négative d'un signal sinusoïdal c'est-à-dire une période. On peut bien y constater que le flux  $\Phi$  est en fonction de l'intensité  $I_1$  du primaire. En effet, pour l'alternance positive,  $\Phi$  augmente lorsque  $I_1$  croît et lorsque  $I_1$  continue à croître, le flux  $\Phi$  atteint une valeur de saturation  $\Phi_s$  et reste constante presque tout au long d'une alternance. Il en est de même pour l'alternance négative.

La loi de Lenz-Faraday stipule que :

$$\varepsilon = - \frac{d\Phi}{dt} \quad 1.7.4. b1$$

$$\Rightarrow U = -n \frac{d\Phi}{dt} \quad 1.7.4.b2$$

avec :

- $\varepsilon$  : la force électromotrice en V ;
- $n$  : le nombre de spires de la bobine ;
- $\Phi$  : le flux magnétique en Wb ;
- $U$  : la tension induite en V.

Par conséquent, au moment de la saturation du flux:

$$\Phi = \Phi_s = \text{constante}$$

$$\Rightarrow \frac{d\Phi}{dt} = 0$$

$$\Rightarrow U = -n \frac{d\Phi}{dt} = 0$$

Donc, lors de la saturation du flux, la tension est très faible voire nulle. Par contre, au moment du passage de l'intensité  $I_1$  à 0, la variation du flux dans le temps est très importante ce qui engendre une tension induite très importante au secondaire. Selon le cas, le maximum de cette tension induite peut atteindre jusqu'à 5000V voire plus. Il apparaît évident que cette tension est très dangereuse.

## Chapitre 2. CONCEPTION ET RÉALISATION D'UN SYSTÈME D'ACQUISITION AUTOMATIQUE DE TENSION ET DU COURANT

Pour la conception du système, en premier lieu, nous avons appris les logiciels de base notamment Processing et Arduino IDE (ou Integrated Development Environment). Ensuite, après avoir compris le fonctionnement de la carte Arduino et les différents capteurs, nous avons entamé la CAO et la simulation du circuit sous ISIS proteus. En dernier lieu, nous avons fait l'assemblage des composants électronique avant de faire les essais en charge.

Voici le schéma synoptique permettant de comprendre d'une manière générale le fonctionnement du système d'acquisition automatique de courant et de tension :

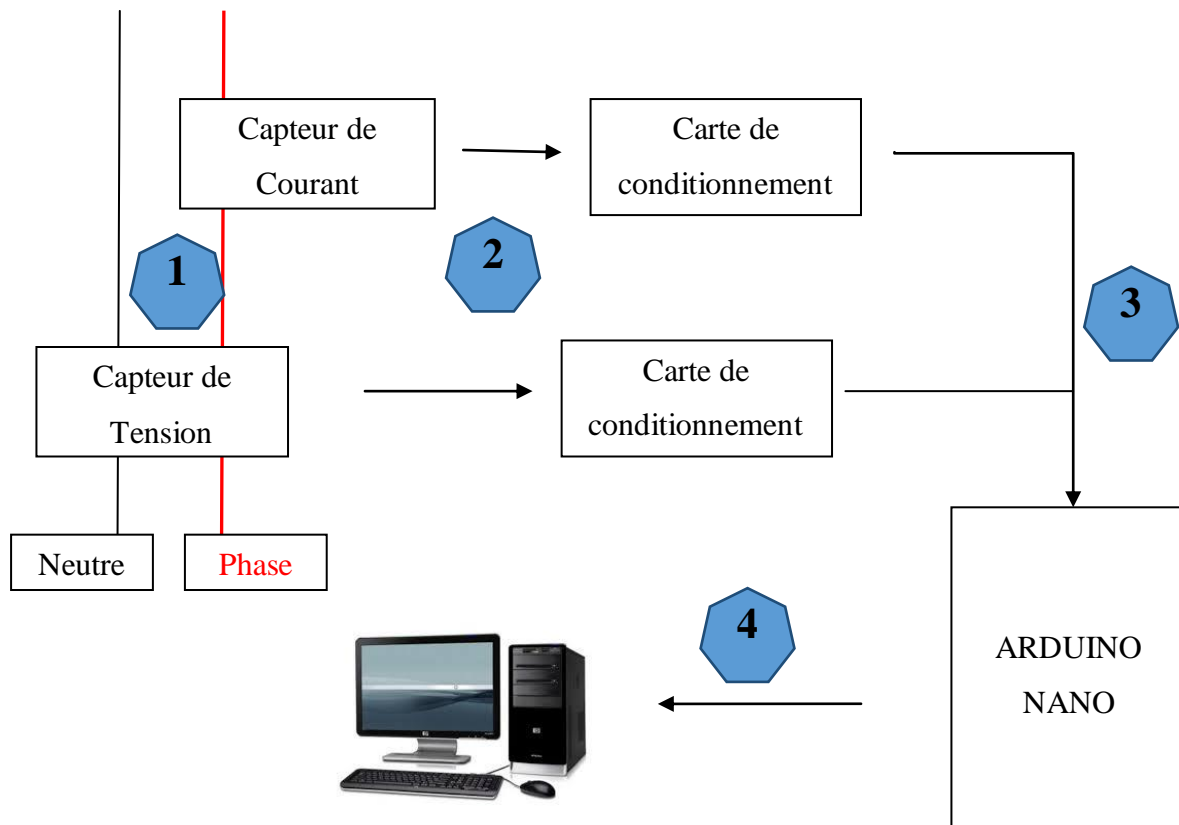


Figure 15 : Schéma synoptique de l'acquisition automatique du courant et de la tension

- 1- le capteur de courant et le capteur de tension captent respectivement les valeurs de l'intensité et de la tension d'une ligne monophasée ;
- 2- ces capteurs envoient les valeurs captées vers les cartes de conditionnement. Plus loin, nous allons comprendre le fonctionnement de cette carte ;

- 3- l'Arduino reçoit un signal sinusoïdal venant des cartes de conditionnement et fait les calculs pour avoir  $I_{eff}$ ,  $U_{eff}$ ,  $S$ ,  $P$  et surtout le facteur de puissance ;
- 4- l'Arduino envoie ces données vers processing via le port série pour être affichées sous forme de courbe et pour être enregistrées sous forme de fichier « \*.txt » lisible sous Excel.

La figure suivante illustre le schéma électrique du système avec les capteurs de tension et du courant. Pour le capteur de courant, sur le schéma il est remplacé par l'ACS712 faute de manque de ce composant électronique dans proteus.

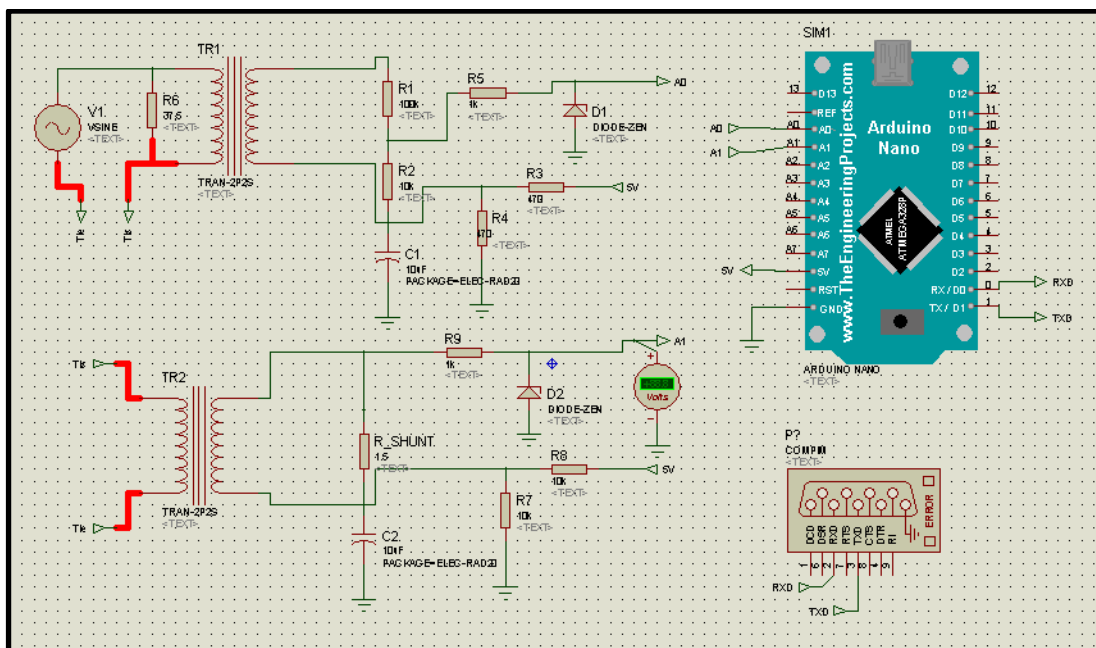


Figure 16 : Schéma électrique du système

Nous allons comprendre un à un les fonctionnements et le principe de chacun de ces éléments.

## 2.1 Capteurs de tension et de courant

### 2.1.1 Capteur de tension

L'importance de mesurer la tension et le courant c'est pour que les valeurs de  $P$  et  $S$  soient exactes. Cette mesure doit se faire d'une façon sécurisée d'où la nécessité d'abaisser la tension alternative 230V. Cette dernière doit être convertie en une tension moins dangereuse (inférieur à 12V) tout en concevant la forme du signal.

Un transformateur de tension est utilisé en guise de capteur de tension. Pour notre cas, notre transformateur est un abaisseur 240V / 10V. Le TT assure une isolation galvanique pour la partie électronique.

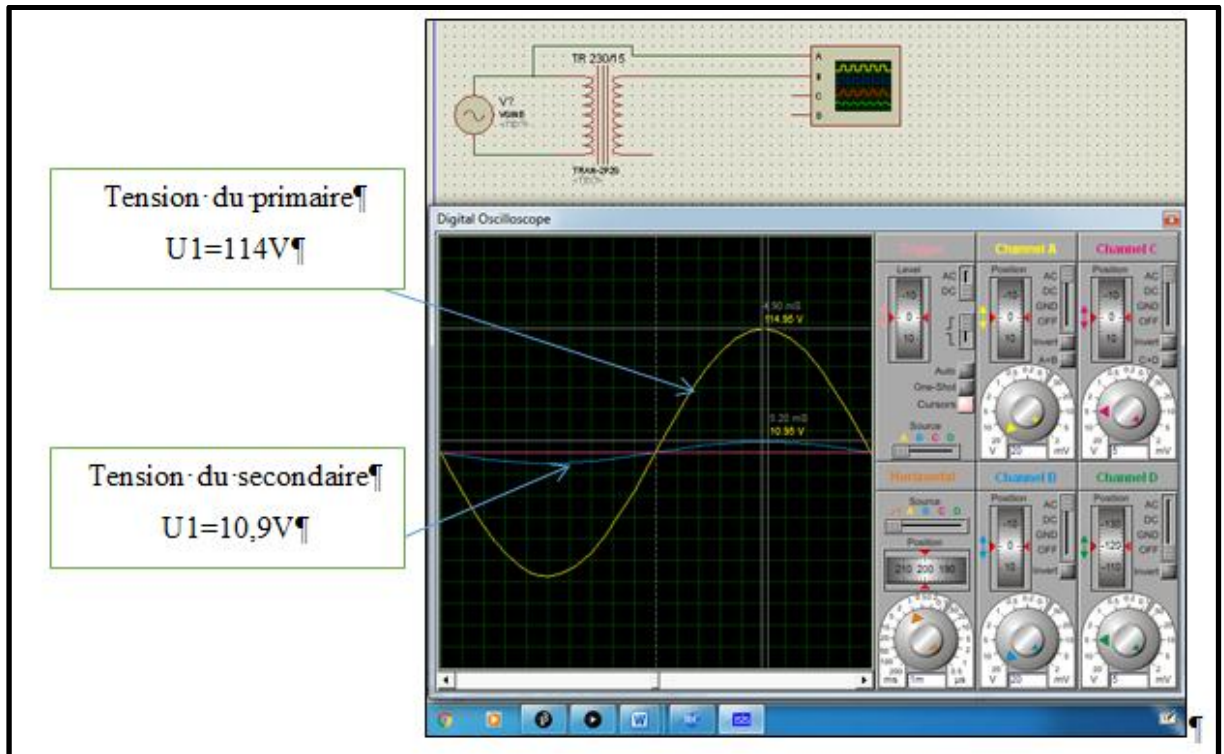


Figure 17 : Simulation du TT sous ISIS Proteus

Nous pouvons bien constater que la tension du secondaire est de même forme que la tension primaire c'est-à-dire toujours sinusoïdale.

Avant qu'on n'injecte la tension ainsi transformée dans l'entrée CAN (Conversion Analogique Numérique) de l'Arduino, il est impératif de la faire passer à travers la carte de conditionnement. Nous verrons d'avantage sur cette carte dans les sous titres plus bas.

## 2.1.2 Capteur de courant

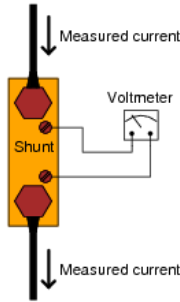


### a. Sélection d'un capteur de courant approprié

Durant la phase de recherche, nous avons effectué pas mal d'essai sur trois types de capteur de courant :

- une résistance shunt ;
- un capteur de courant électronique : l'ACS712 ;
- et un transformateur d'Intensité MSQ-30.

Les caractéristiques de ces capteurs sont résumées dans le tableau ci-dessous.

**Tableau 2 : Caractéristique des capteurs de courant**

Type de Capteur	Illustration	Plage de mesure	Spécification
Résistance shunt	 <p>Source : <a href="http://www.allaboutcircuits.com/">http://www.allaboutcircuits.com/</a></p>	0 – 100 A (mais en fonction de la valeur de la résistance)	Capteur de courant utilisé pour mesurer un courant continu
ACS712	 <p>Source : <a href="http://www.banggood.com/">http://www.banggood.com/</a></p>	0 à 5 A ou 0 à 20 A	Capteur de courant alternatif pour une puissance de 4600 VA sous 230V
TI MSQ-30		0 – 100 A	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Capteur de courant alternatif</li> <li>- Classe : 1</li> <li>- Poids : 0,4kg</li> <li>- Ratio : 100/1</li> </ul>

D'après les tests en laboratoire et le tableau ci-dessus, c'est le MSQ-30 qui est le plus adapté à notre projet. En effet, c'est ce capteur de courant qui supporte le plus les courants industriels qui sont souvent d'une valeur très élevée. Parmi les autres capteurs testés, il est le seul TI capable de ramener ces courants vers une valeur raisonnable (environs 5A max). Le MSQ-30 est aussi le plus sûr en ce qui concerne l'isolation galvanique entre le primaire (fort courant) et le secondaire (courant mesurable).

Nous avons donc sélectionné le TI qui a une configuration telle que :

- type : MSQ-30 ;
- ratio : 100/1 ;
- puissance 5VA ;
- classe : 1.

### b. Courant généré par le MSQ-30

Puisque ce TI est spécifié pour le courant alternatif en ayant une plage de mesure de 0 à 100A, le courant maximum mesuré est donc :

$$I_{1max} = 100 \cdot \sqrt{2}$$

$$I_{1max} = 141,4 \text{ A}$$

Puisque le Ratio est 100/ 1 (ce qui veut dire que si  $I_1=100\text{A}$ ,  $I_2=1\text{A}$ ) alors le courant maximal généré par le MSQ-30 est

$$I_{2max} = 1,41\text{A}$$

### c. Conversion du courant du primaire en tension au secondaire du TI

Le principal objectif est de pouvoir mesurer le courant du primaire du TI grâce à la CAN d'un Arduino. Par contre, la forme de la tension délivrée par le TI n'est pas comme celle de l'intensité à mesurer. De plus, nous avons vu au chapitre précédent qu'il est très dangereux de ne pas court-circuiter les bornes du TI. Il nous faut donc convertir l'intensité du primaire du capteur de courant en une tension au secondaire. Aussi, la forme de cette tension doit être parfaitement sinusoïdale à l'image de l'intensité à mesurer. Pour cela, nous avons monté une résistance shunt  $R_{sh}$  aux bornes du secondaire du capteur de courant. C'est la tension aux bornes de cette  $R_{sh}$  qui sera échantillonnée par l'Arduino.

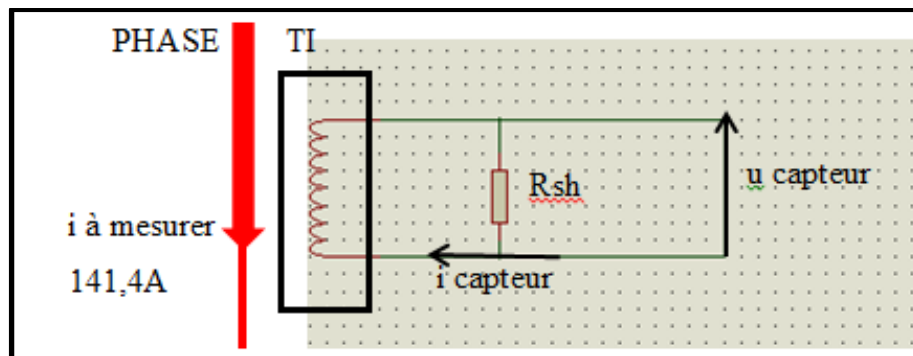


Figure 18 : Conversion de l'intensité délivrée par le TI en une tension

### d. Calcul de la valeur de Rsh

On sait que l'intensité à mesurer est sinusoïdal oscillant autour de 0V et qu'Arduino accepte seulement une valeur comprise entre 0 et 5V. De plus, pour pouvoir mesurer la tension instantanée  $u(t)$  et le courant instantané  $i(t)$ , il est impératif que le signal conserve la forme sinusoïde. D'après ces informations, il nous faut donc faire osciller la tension  $u_{capteur}$  autour de 2,5V avec un maximum de 5V et un minimum de 0V.

Pour que cet objectif soit atteint, la valeur de  $R_{sh}$  doit assurer que la tension  $u_{capteur}$  maximale soit égale à 2,5V.



comme,

$$u_{\text{capteur}} = R_{\text{sh}} \times i_{\text{capteur}}$$

$$\text{alors } R_{\text{sh}} = \frac{u_{\text{capteur}}}{i_{\text{capteur}}}$$

$$\Rightarrow R_{\text{sh}} = \frac{2,5}{1,41}$$

$$\Rightarrow R_{\text{sh}} = 1,77 \Omega$$

De façon idéale,  $R_{\text{sh}} = 1,77 \Omega$ . Mais puisqu'il est impossible de trouver exactement cette valeur sur le marché, nous avons pris  $R_{\text{sh}} = 1,5 \Omega$

Nous allons comparer le graphe de la tension à la sortie du secondaire d'un TI avec et sans  $R_{\text{sh}}$ . La Figure 19 représente le graphe de la tension à la sortie du TI sans  $R_{\text{sh}}$ .

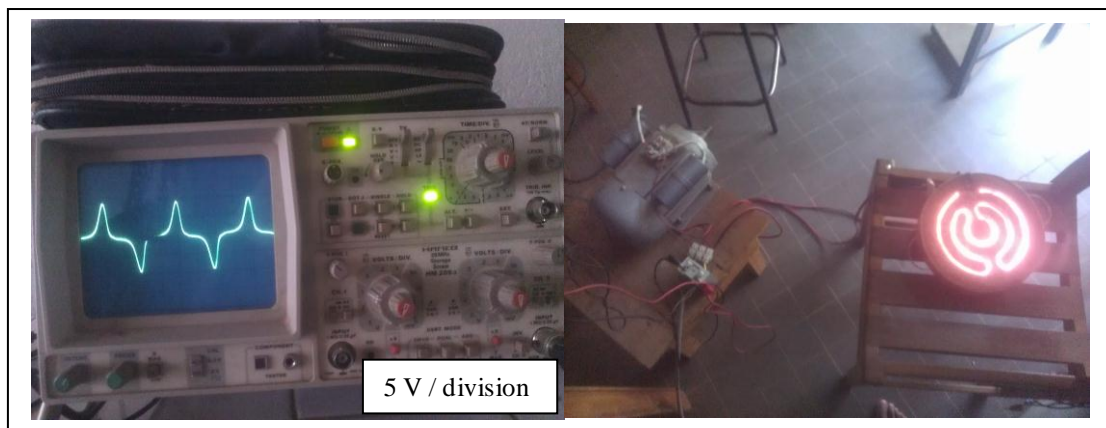
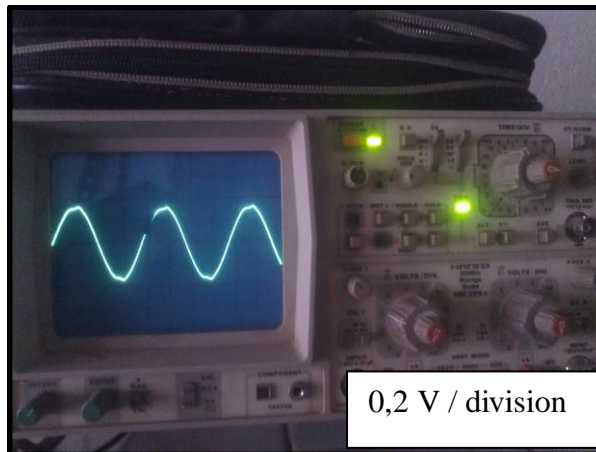


Figure 19 : Graphe de la tension aux bornes du secondaire d'un TI sans  $R_{\text{sh}}$  (à gauche) et les charges (à droite)

Les charges utilisées sont une résistance chauffante et un moteur. Nous avons utilisé un oscilloscope (5V/division) pour pouvoir interpréter graphiquement la tension du secondaire du TI. Nous constatons que le signal est déformé et des pics de tension se forment. Cette déformation est due au fait que le secondaire du TI n'est pas court-circuité par un  $R_{\text{sh}}$ . Il serait donc très dangereux de brancher directement un TI à l'Arduino au risque de le détruire.

Nous allons voir sur la figure suivante la courbe de la tension aux bornes du TI avec une  $R_{\text{sh}}$  avec les mêmes charges Tension aux bornes d'un TI court-circuité par une  $R_{\text{sh}}$



**Figure 20 : Tension aux bornes d'un TI court-circuité par une Rsh**

Nous pouvons constater sur la figure ci-dessus que le signal est bien sinusoïdal conformément au signal de l'intensité à mesurer. Arduino peut facilement faire la conversion analogique numérique pour faire l'échantillonnage de cette tension.

Une résistance shunt est donc indispensable pour connaître la valeur de l'intensité délivrée par le secondaire. Il suffit de mesurer la tension aux bornes de  $R_{sh}$  avec Arduino par l'intermédiaire d'une carte de conditionnement pour le TI.

## **2.2 Cartes de conditionnement**

Les signaux venant du TT et TI sont sinusoïdaux. Les entrées analogiques de l'Arduino ne peuvent échantillonner qu'une tension positive. Il est donc impératif d'ajouter 2,5V à chacune des tensions délivrées par le TT et le TI. Il est aussi obligatoire de faire en sorte que l'oscillation du signal se fasse seulement dans la partie positive et autour de 2,5V.

### 2.2.1 Carte pour le TT

Le circuit de la carte de conditionnement pour le transformateur de tension est représenté par la figure suivante.

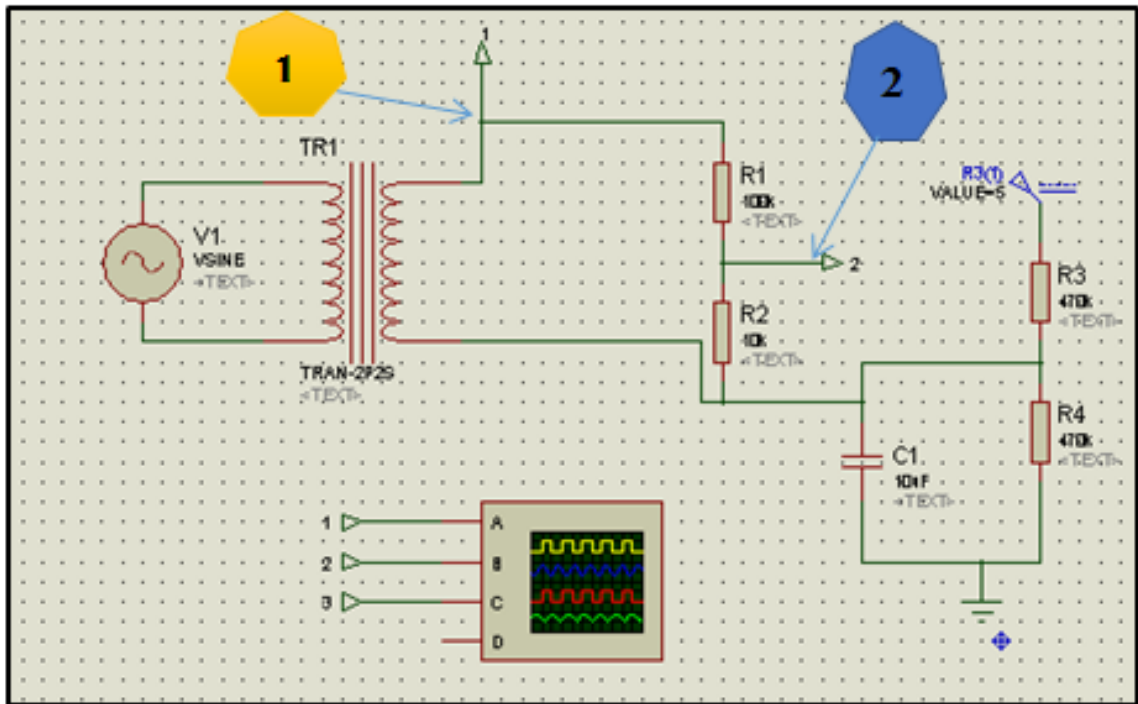
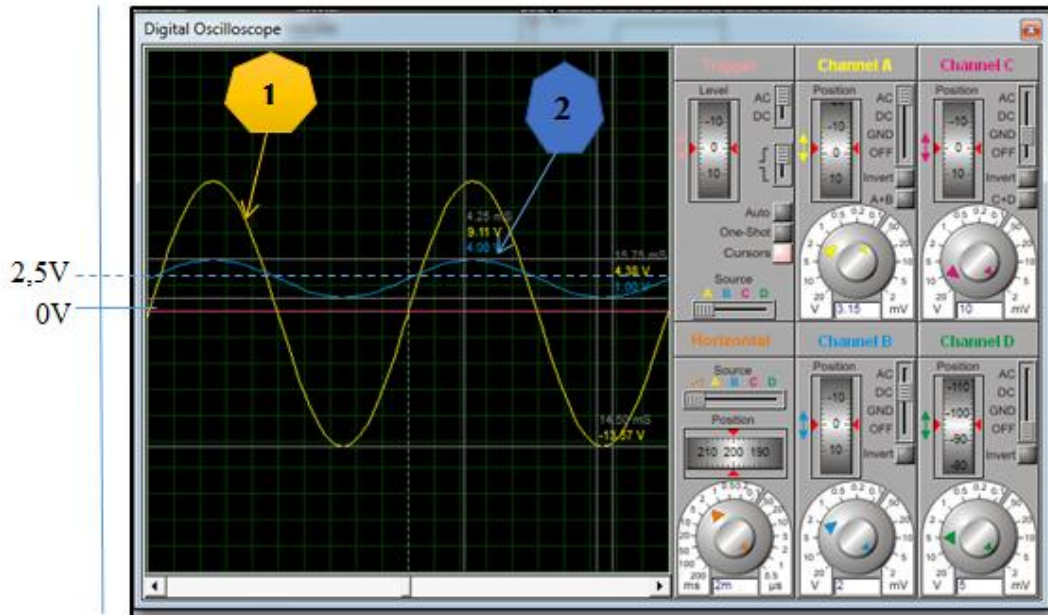


Figure 21 : Carte de conditionnement pour le TT

Le connecteur n°1 correspond à la courbe de couleur jaune qui est la tension à la sortie du transformateur. Le connecteur n°2 est relatif à la courbe de couleur bleu qui la tension de sortie de la carte de conditionnement.

Les résistances R1 et R2 forment un diviseur de tension pour la sortie du transformateur. R3 et R4 divisent la tension 5V en deux pour avoir le point milieu 2,5V.

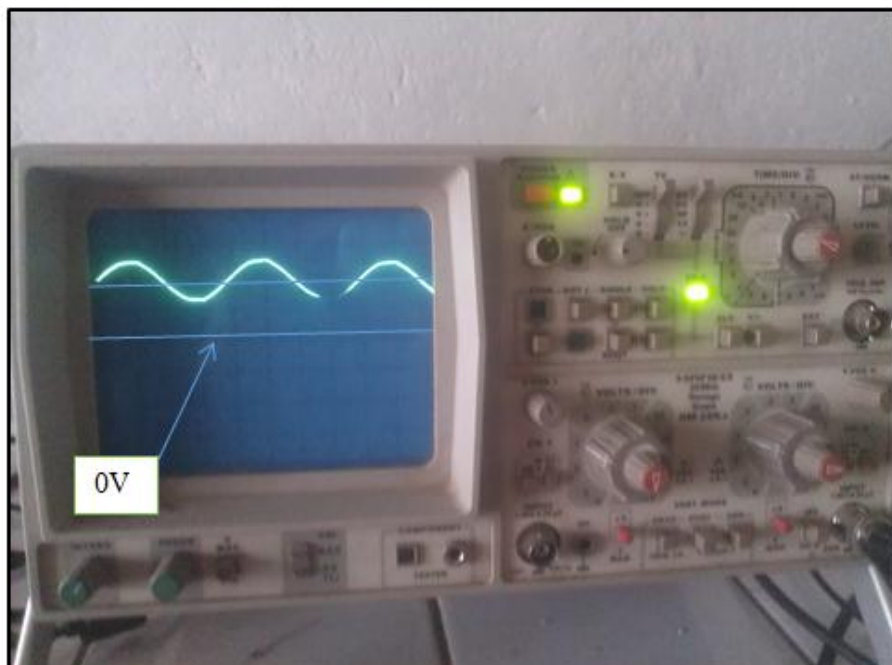
La Figure 22 nous montre le résultat de la simulation de cette carte sous ISIS :



**Figure 22 : Simulation sous ISIS proteus de la carte de conditionnement pour le TT**

On peut bien constater que la courbe n°1 de la sortie du transformateur a comme origine 0V. Par contre, à la sortie de la carte de conditionnement, la courbe n°2 oscille autour de 2,5V.

D'après l'expérimentation de la carte de conditionnement, nous percevons graphiquement sur la figure ci-dessous le décalage de l'axe d'oscillation du signal :



**Figure 23 : Oscillogramme à la sortie de la carte de conditionnement du TT**

### 2.2.2 Carte pour le TI

Comme le transformateur de tension, la sortie du transformateur d'intensité doit être également conditionnée. La figure ci-dessous montre le circuit de la carte de conditionnement pour le TI :

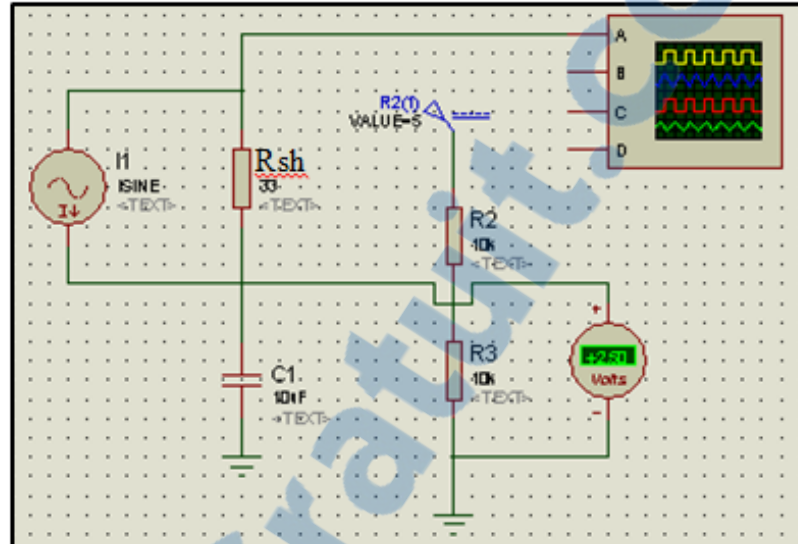


Figure 24 : Carte de conditionnement pour le TI

R2 et R3 assurent la division de la tension 5V en 2,5V.

Par simulation, nous avons le résultat représenté par la figure 25.

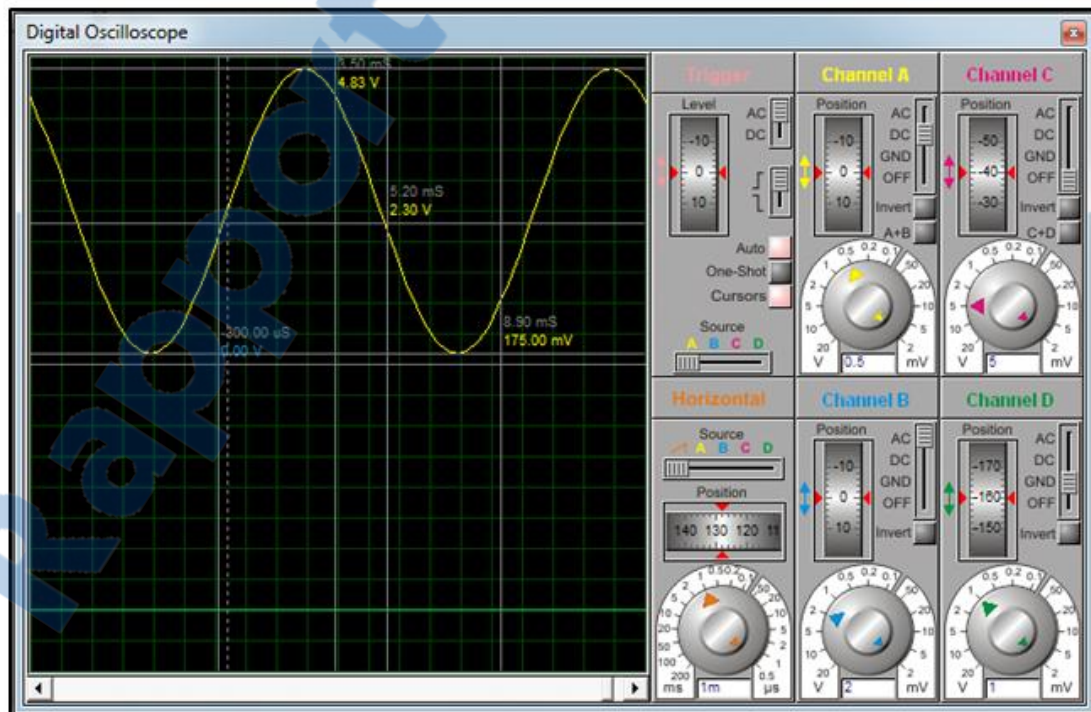


Figure 25 : Simulation sous ISIS proteus de la carte de conditionnement pour le TI

En pratique, voici l'oscillogramme de la tension à la sortie de la carte de conditionnement vers l'entrée analogique de l'Arduino :

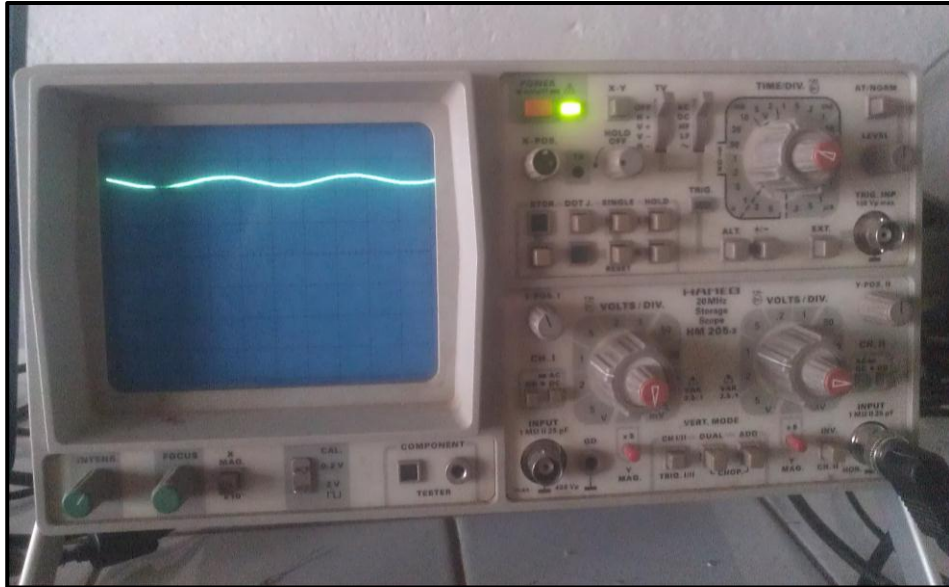


Figure 26 : Oscillogramme à la sortie de la carte de conditionnement du TI

### 2.3 Arduino

L'Arduino nano est le cerveau du système d'acquisition de la tension et du courant. Il reçoit les informations venant des capteurs par les pins analogiques A0 pour la tension et A1 pour l'intensité. Il fait ainsi la conversion des tensions analogiques variant de 0 à 5V en une valeur numérique entre 0 et 1023. Le nombre vu par Arduino est :

$$N = \frac{U_{CAN}}{5} \times 1023 \quad 2.3$$

avec :

- N : nombre numérique ;
- $U_{CAN}$  : tension à l'entrée analogique d'Arduino ;

Pour lire les valeurs sur les entrées analogiques, nous utilisons la fonction *analogRead()*. Voici une partie du programme utilisant cette fonction

```
adc_U = analogRead(A0); // lecture du pin A0
adc_I = analogRead(A1); // lecture du pin A0
```

À partir de ces nombres N lus sur A0 et A1, nous pouvons calculer respectivement les tensions (instantanée et efficace) ainsi que les courants (instantané et efficace). Ensuite, nous en déduisons les valeurs des puissances (apparente, active et réactive) et celle du facteur de puissance  $\cos(\varphi)$ .

### 2.3.1 Calcul des valeurs efficaces et instantanées

Il est à rappeler que la CAN de l'Arduino a une plage d'entrée de 0 à Vcc (5V). Lorsque nous faisons l'échantillonnage d'un signal sinusoïdal, la forme d'onde doit être polarisée à  $V_{cc}/2 = 2,5V$ . Le décalage numérique est donc environ 512. L'échantillonnage varie donc de 0 à 1023 et centré autour de 512.

#### a. Filtre numérique

Nous remarquerons que le 2,5V que nous avons ajouté grâce à la carte de conditionnement correspond à  $N=512$ . Nous aurons tendance à soustraire 512 de la valeur numérique lue par la CAN. C'est effectivement le raisonnement pour enlever le décalage mais cela augmente les erreurs des erreurs. En effet, les valeurs de chaque composant de la carte de conditionnement ne sont pas exactement comme indiquées sur les composants. Pour la carte du TI par exemple, R2 et R3 ont les mêmes valeurs mais dans la réalité, ces résistances ont leur propre tolérance ou défaut de fabrication. Le 512 pourrait être 511 ou 513 et pourrait même varier du jour au lendemain. Donc la soustraction directe du nombre numérique lu avec 512 n'apparaît pas comme une bonne solution. Il nous faut procéder numériquement pour enlever le décalage.

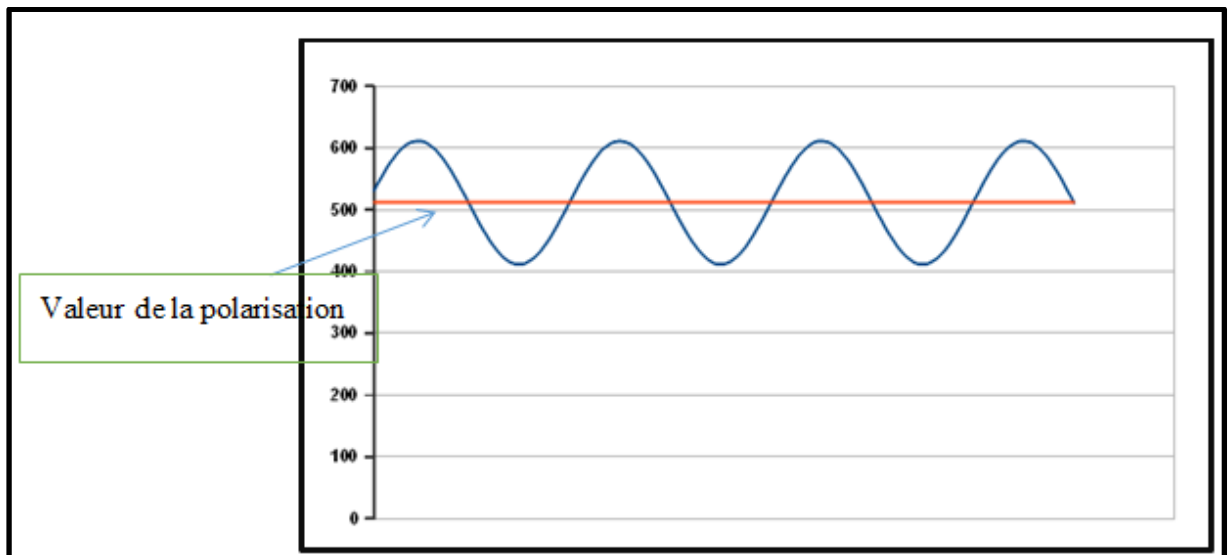
Le filtre numérique fera automatiquement la recherche du décalage qui est au tour de 512. Le programme correspondant à ce filtre numérique est comme suit :

```
Valeur_Offset_U = Derniere_Valeur_Offset_U + (a x (adc_U - Derniere_Valeur_Offset_U)) ;  
Valeur_Offset_I = Derniere_Valeur_Offset_I + (a x (adc_I - Derniere_Valeur_Offset_I)) ;
```

Où « a » est une constante qui prend une très petite valeur pour avoir assez de temps et de nombre d'échantillonnage.

En prenant  $a=0,004$  ; cela nous donne 250 nombres d'échantillonnage selon la formule :

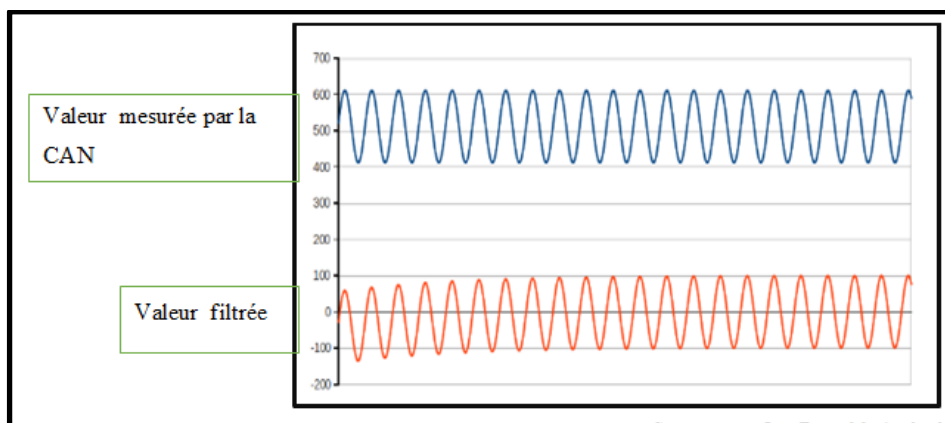
$$\text{Nombre d'échantillonnage} = \frac{1 - a}{a} \quad 2.3. a$$



Source : [www.OpenEnergyMonitor.html](http://www.OpenEnergyMonitor.html)

**Figure 27 : Recherche de la valeur de la polarisation**

Après avoir détecté la valeur de la polarisation, nous avons procédé ensuite à la soustraction de cette valeur au signal.



Source : [www.OpenEnergyMonitor.html](http://www.OpenEnergyMonitor.html)

**Figure 28 : Valeur filtrée du signal**

En appliquant ce filtre numérique au signal correspondant respectivement à la tension et au courant, nous pouvons maintenant procéder au calcul des valeurs instantanées et valeurs efficaces.

### b. Calcul des valeurs instantanées

- *Pour la tension*: ces valeurs sont issues de la conversion de la CAN à chaque échantillonnage :

$$U_{\text{instantanee}} = (((\text{Valeur\_Offset\_U} * 5) / 1023) * 230) / 0,49 ;$$



0,49 est la tension en Volt mesuré par Arduino lorsqu'une tension de 230 V est captée par le capteur de tension. Nous avons utilisé un autotransformateur pour faire l'étalonnage de la tension.

En variant l'autotransformateur, on peut avoir une tension allant de 0 jusqu'à la tension maximale de 230V.

Nous allons voir plus loin les erreurs de phase et ses corrections pour la mesure de la tension.



**Figure 29 : Autotransformateur pour l'étalonnage de la tension**

- *Pour le courant* : voici le programme pour le courant instantané

$$I_{instantanee} = (((Valeur\_Offset\_I*5)/1023)*100)/Rsh;$$

Rappelons que « Valeur\_Offset\_I » est le résultat de la CAN.

Donc

$$U_{capteur} = (Valeur\_Offset\_I*5)/1023 = Rsh \times I_{capteur}$$

$$\Rightarrow I_{capteur} = ((Valeur\_Offset\_I*5)/1023)/ Rsh$$

Or, le TI a un ratio de 100/1 c'est-à-dire que si le courant principal est  $I_{mésurer} = 100$  A, le secondaire délivre  $I_{capteur} = 1$  A.

$$\Rightarrow I_{mésurer} = 100 \times I_{capteur}$$

$$\Rightarrow I_{mésurer} = (((Valeur\_Offset\_I*5)/1023)/ Rsh)*100$$

### c. Calcul des valeurs efficaces

Pour calculer la valeur efficace que ce soit pour la tension ou l'intensité, nous procédons comme suit :

- élever au carré la valeur lue par la CAN ;
- faire la somme de la valeur ainsi obtenue ;
- mémoriser cette somme dans une variable jusqu'à ce que le nombre d'échantillonnage soit atteint ;
- lorsque le nombre d'échantillonnage voulu est atteint, on calcule la valeur moyenne ;

- et enfin, on prend la racine carrée de cette valeur moyenne et on obtient la valeur efficace.

En ce qui concerne la conversion de la valeur numérique en tension ou en courant, cela se fait exactement comme celle du courant et de la tension instantanée.

L'organigramme relatif au calcul des valeurs efficaces est représenté en annexe 1.

### 2.3.2 Calcul de la puissance active

La puissance active se calcule sous Arduino en utilisant l'équation 1.5.1.b3

- on multiplie la tension instantanée avec le courant instantané pour avoir la puissance instantanée ;
- puis on fait la somme algébrique de cette puissance instantanée jusqu'à ce que le nombre d'échantillonnage ne soit atteint ;

```
Puiss_instantanE = Uinst*Iinst;  
Somme_Puiss_instantanE += Puiss_instantanE;
```

- lorsque le nombre d'échantillonnage est atteint, nous calculons la moyenne de cette somme en la divisant avec 250 pour avoir la puissance active.

```
Puissance_active = Somme_Puiss_instantanE / 250
```

### 2.3.3 Calcul de la puissance apparente et du facteur de puissance

Voici le programme pour calculer la puissance apparente :

```
Puissance_apparente = Ueff * Ieff ;
```

Pour le facteur de puissance :

```
CosPhi = Puissance_Active / Puissance_apparente ;
```

### 2.3.4 Calcul de l'énergie

L'intervalle de temps considéré pour calculer l'énergie est ce de l'échantillonnage qui est de  $t=30$  seconde. L'énergie se calcule donc comme suit :

Nous avons

$$E = P . t$$

$$\Rightarrow E = \frac{P \cdot 30}{3600 \cdot 1000}$$

Cela se traduit comme la suivante en Arduino :

```
Energie += ((PuissActive*30)/3600)/1000;
```

### 2.3.5 Erreurs à considérer

Il existe des erreurs à prendre en compte dues :

- aux capteurs de courant et de tension ;
- à la durée d'échantillonnage et de conversion existant entre l'acquisition de la tension et du courant. [9]

#### a. Erreur due aux capteurs

Les capteurs de courant et de la tension présentent des erreurs en ce qui concerne l'angle de phase et cela varie en magnitude.

Pour les capteurs de tensions, cette erreur augmente approximativement linéaire avec l'augmentation de la tension. Pour les capteurs de courant, l'erreur diminue rapidement en premier temps avec l'augmentation du courant puis atteint sa valeur minimum avant d'augmenter pour atteindre une valeur de saturation.

L'approximation des valeurs de changement d'angles pour les capteurs de tension est résumée de manière générale dans le tableau ci-dessous.

**Tableau 3 : Changement d'angle en fonction de la tension**

Tension (V)	Angles (en °)
225	3/2
240	4/2
253	5/2

Pour les capteurs de courant, ce changement d'angle en fonction du courant est résumé dans le tableau ci-dessous :

**Tableau 4 : Changement d'angle en fonction de l'intensité**

Courant (A)	Angle (en °)
3	3/2
30	2/2
60	2

En réalité, ces erreurs vont vers une même direction. Cela implique qu'elles n'affectent pas à l'erreur nette et elles peuvent être très faibles.

**b. Erreur due à la durée d'échantillonnage (CAN)**

La durée d'échantillonnage et de la conversion existant entre l'acquisition de la tension et du courant est aussi une source d'erreur. Avec Arduino, cette durée est approximativement 100µs. Donc, la tension est mesurée en avance par rapport au courant pour une valeur de 2°. Le calcul se fait comme suit :

Pour une fréquence de 50Hz :

$$f = 50\text{Hz} \Leftrightarrow T = 20\text{ms} \Leftrightarrow 360^\circ$$

$$\Leftrightarrow \frac{Er}{100 \cdot 10^{-6}} = \frac{360}{20 \cdot 10^{-3}}$$

$$\Leftrightarrow Er = \frac{100 \cdot 360 \cdot 10^{-6}}{20 \cdot 10^{-3}}$$

$$\Leftrightarrow Er = 1,8^\circ \cong 2^\circ$$

Par conséquent, l'erreur nette varie entre 2° et 5/2°.

Si dans le programme, l'intensité est mesurée avant la tension, l'erreur nette est alors entre - 2° et +1/2°.

Il apparaît évident de considérer cette erreur car le facteur de puissance est le cosinus de l'angle de phase (cos(φ)).

- Pour le cas d'une résistance pure (cos(φ) = 1) :

- cos(2) = 0,9994

- cos(5/2) = 0.999

⇒ Le cos(φ) est erroné entre 0,0006 et 0,001

Pour notre cas où la tension est mesurée avant l'intensité. Le programme avec la correction de cette erreur est :

```
U_filtre = adc_U - Valeur_Offset_U ;
phaseSifte_U = dernier_U_filtre + (B*(U_filtre - dernier_U_filtre)) ;
```

$B = 1,28$  corrige l'erreur de  $2^\circ$  sur la tension.

$B = 1 \Rightarrow$  il n'y a pas de changement ni de correction

$B = 0 \Rightarrow$  décalage vers la droite

$B = 2 \Rightarrow$  décalage vers la gauche

### 2.3.6 Transfert de données vers le port série

Une fois que les  $U_{eff}$ ,  $I_{eff}$ ,  $S$ ,  $P$  et  $\cos(\varphi)$  calculés, Arduino envoie ces valeurs vers le port série. Ces données sont transférées vers l'ordinateur via le câble mini-USB grâce à la fonction : « `Serial.print();` » .

Cet envoi marque la fin de l'acquisition des données et le début de la partie traçage et enregistrement.

## 2.4 Traçage des courbes et enregistrement sur disque dur

### 2.4.1 Application exécutable

Nous avons créé une application sous forme de fichier exécutable avec l'environnement de programmation Processing. Le traçage des courbes et l'enregistrement sur disque dur sont assurés par cette application. Nous avons fait un résumé sous forme de tableau de la configuration minimale requise par cette application :

**Tableau 5 : Configuration requise par l'application**

Système d'exploitation	Windows XP ou Windows 7 (32bits ou 64bits)
Espace disque minimum	200 Mo
RAM	256Mo

Sur l'axe des ordonnées, nous trouvons les valeurs de l'intensité en Ampère (A). En multipliant par 10 ces valeurs de l'ordonnée, nous obtiendrons la valeur de la puissance active et de l'énergie consommée.

Sur l'axe des x figurent les heures de fonctionnement de la microcentrale hydroélectrique. Les valeurs de cet axe sont automatisées pour suivre l'heure de démarrage du logiciel. Elles sont aussi synchronisées avec l'horloge de l'ordinateur où l'application est installée.

La figure suivante illustre l'interface du logiciel ainsi que les courbes.

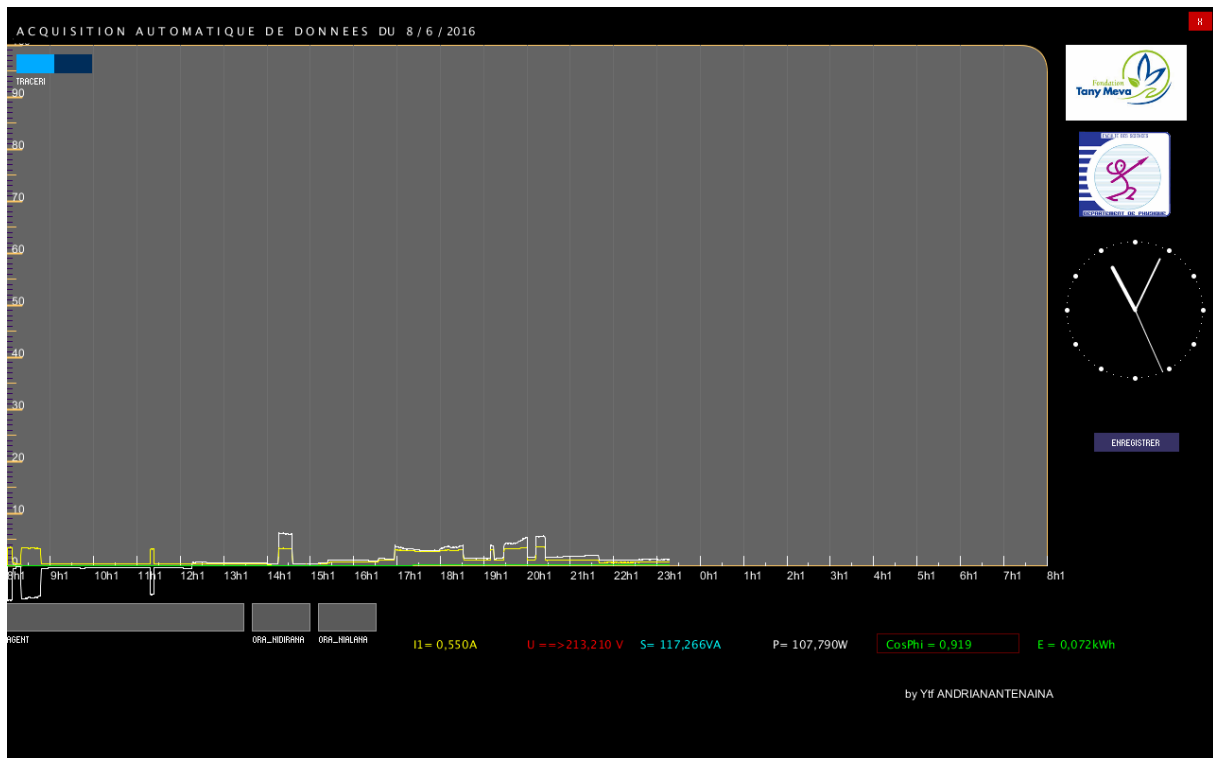


Figure 30 : Interface de l'application

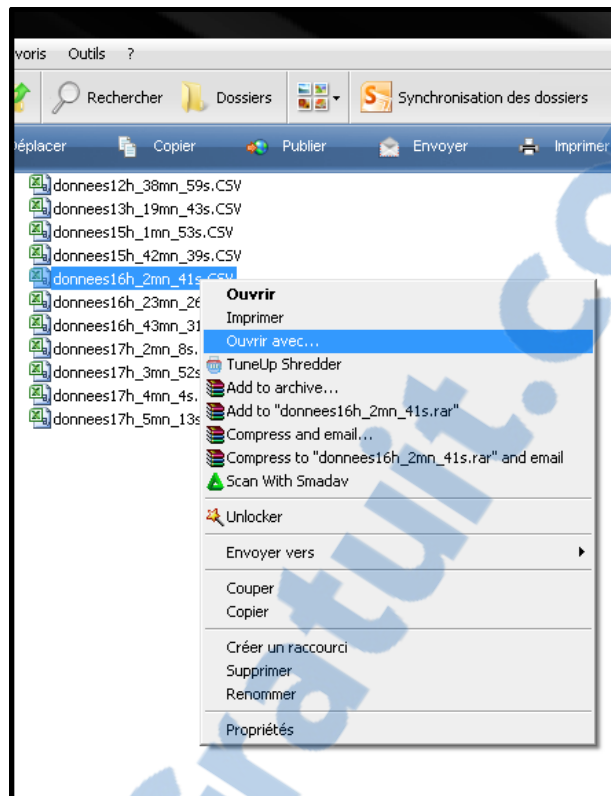
#### 2.4.2 Traçage de la courbe

Ce logiciel trace les courbes de l'intensité et de la puissance active en fonction du temps. Il affiche également en valeur numérique la tension, l'intensité, la puissance apparente, la puissance active et le facteur de puissance. Nous avons également fait le calcul de l'énergie consommée comme son affichage à l'écran sous ce logiciel.

Il reçoit les données provenant de l'Arduino. À chaque 30s, il trace et affiche sous forme numérique les valeurs acquises.

#### 2.4.3 Enregistrement sur disque dur

Tous les trente secondes (30s), l'application effectue automatiquement un enregistrement sur le disque dur. Le fichier de sauvegarde a une extension \*.txt c'est-à-dire que c'est un fichier texte. Il suffit d'y faire un clic avec le bouton droit de la souris puis ouvrir avec Excel pour avoir des tables éditables. Quand le fichier est ouvert avec Excel, il est impératif de remplacer tous les points par une virgule. Les chiffres décimaux ont à l'origine un point à la place de la virgule.



**Figure 31 : Fichier d'enregistrement**

Après 24 heures du démarrage de l'application, elle effectue automatiquement un enregistrement de la courbe. Cette fois ci, le fichier a une extension \*.TIF c'est-à-dire un fichier image. Avec la recommandation de notre encadreur professionnel, un bouton « Enregistrer » a été créé afin de pouvoir faire à tout instant l'enregistrement de la courbe sous forme image.

## Chapitre 3. RÉSULTATS À L'ISSU DES EXPÉRIMENTATIONS ET INTERPRÉTATIONS

### 3.1 Système d'acquisition automatique de tension et du courant

À titre d'expérimentation et d'essai, nous avons conçu un système pour faire l'acquisition d'une ligne monophasée. La figure suivante illustre les emplacements réels des composants électroniques sur la plaquette et son support.

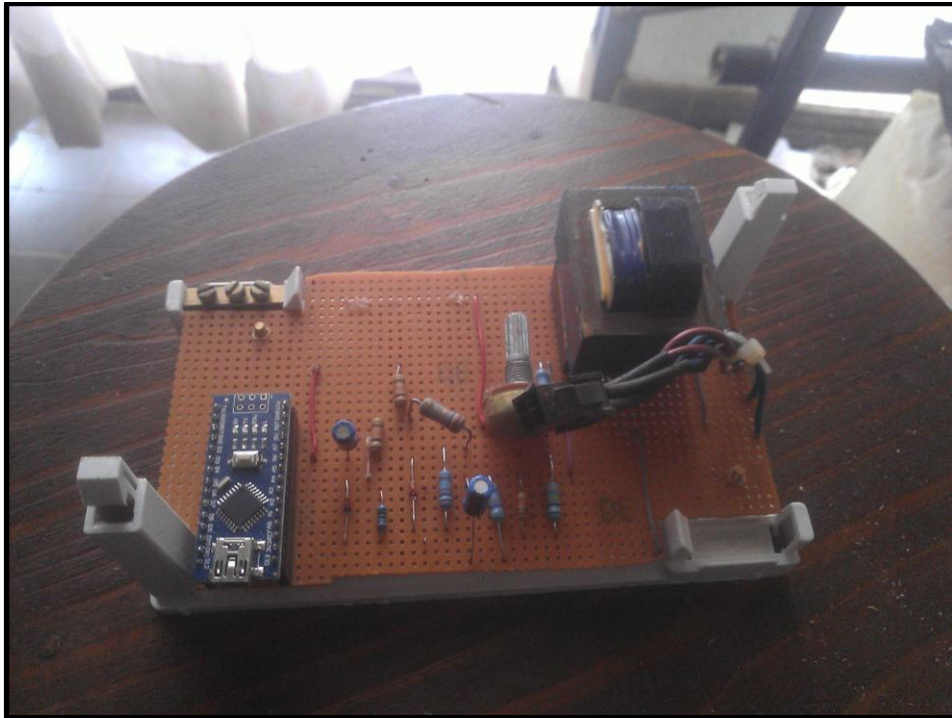


Figure 32 : Système d'acquisition automatique de tension et de courant

### 3.2 Essai en charge du système

Les sociétés ont besoin de l'intensité efficace, de la tension efficace, de la puissance active, de la puissance apparente, du facteur de puissance et des énergies produites. Nous allons voir par la suite les valeurs obtenues durant les essais avec des charges différentes.

#### 3.2.1 Intensité efficace

En prenant en compte une ligne monophasée, pour une centrale hydroélectrique, il existe deux types d'intensités efficaces :

- l'intensité produite ;
- et l'intensité consommée.

L'intensité produite est obtenue avant la dérivation vers la résistance ballaste. L'intensité consommée est donc juste après la résistance ballaste. Au moment de la phase de test, le PCH d'Andriantsemboka, prévu pour faire l'essai, était hors d'usage. Notre test s'est



alors réduit à l'acquisition de l'intensité consommée en utilisant les charges disponibles au laboratoire et chez un ménage.

### a. Correction de l'erreur de façon expérimentalement

Nous avons résumé sur le tableau ci-dessous la première comparaison de la mesure de l'intensité par notre système et par un ampèremètre certifié.

**Tableau 6 : Première comparaison de la valeur de l'ampèremètre et le S.A.A.I.T.**

Ampèremètre (en A)	0,003	4,1	4,07	5,15	5,1	8,53	8,6
S.A.A.I.T.	0,05	4,35	4,33	5,51	5,46	9,2	9,31
Erreur en %	-	6,10	6,39	6,99	7,06	7,85	8,26

Malgré le fait qu'on a corrigé les erreurs grâce à la multiplication de la valeur de la tension par 1,28, nous avons constaté le pourcentage d'erreur ci-dessus. Ce dernier sont due à la résistance shunt Rsh. Théoriquement, la valeur de cette résistance devrait être  $R_{sh} = 1,7\Omega$ . Pratiquement, nous n'avons pas parvenu qu'à la valeur de  $R_{sh} = 1,5\Omega$ . Nous avons eu cette valeur en montant en parallèle deux résistances de  $1\Omega$  pour avoir une résistance équivalente de  $0,5\Omega$ . Ensuite, nous avons monté en série cette résistance de  $0,5\Omega$  avec une  $1\Omega$  pour obtenir  $R_{sh} = 1,5\Omega$ .

Pour corriger cette erreur, nous avons pris le pourcentage moyen de  $Er = 7,11\%$ . Après cela, nous avons obtenu les valeurs dans le tableau ci-dessous :

**Tableau 7 : Comparaison après correction de l'erreur**

Ampèremètre (en A)	0,003	4,06	5,16	5,25	8,77
S.A.A.I.T.	0,05	4,05	5,17	5,26	8,78
Erreur %	-	0,25	0,19	0,19	0,11

Nous pouvons remarquer la diminution du pourcentage de l'erreur pour une valeur assez acceptable.

### b. Comparaison des valeurs de l'acquisition et de l'ampèremètre

Le tableau suivant nous montre la comparaison entre les valeurs en Ampère obtenues par acquisition de l'intensité et celles affichées sur un multimètre en fonction des charges.

**Tableau 8 : Valeurs de l'intensité avec différentes charges**

Charges	Acquisition (en A)	Multimètre (en A)
Disjoncteur ouvert	0	0
Ordinateur portable	0,31	0,30
Moteur électrique	2,01	2,00
Résistance	5,18	5,15
Résistance + Moteur électrique	6,23	6,22

### 3.2.2 Tension efficace

Pour la tension, nous n'avons pas eu besoin de faire de l'essai en charge car en pratique elle ne présente pas de variation significative en fonction des charges. Il suffisait de faire un étalonnage avec un autotransformateur et un voltmètre. Le tableau suivant nous donne les données durant notre essai en variant la tension en Volt grâce à l'autotransformateur :

**Tableau 9 : Comparaison de la tension à la sortie d'un autotransformateur et celle mesurée par le système d'acquisition**

$U_{\text{autotransfo}}$	0	24,9	50,1	75,3	100,6	150	200	230
$U_{\text{S.A.A.I.T.}}$	2,7	25,5	50,6	75,7	101,2	151	206	231,5

Contrairement à l'intensité, même si la tension représente une erreur, elle est facilement corrigeable grâce au potentiomètre installée à l'intérieur du circuit.

### 3.2.3 Puissance apparente

Il suffit d'avoir une tension efficace et une intensité efficace bien étalonnées pour avoir une valeur exacte de la puissance apparente. Pour vérifier cette puissance, nous avons utilisé une résistance chauffante d'une valeur de  $49\Omega$  et une tension maintenue à 224V. La puissance apparente théorique est alors :

$$S = \frac{U^2}{R} = \frac{224^2}{49} = 1024,57 \text{ VA}$$

En faisant la mesure avec le système, nous avons obtenu le résultat résumé par tableau suivant :

**Tableau 10 : Puissance apparente**

Intensité efficace	4,6 A
Tension efficace	224 V
Puissance apparente	$S = 1025 \text{ VA}$

Ci-dessous les résultats obtenus pour S en variant la nature de la charge

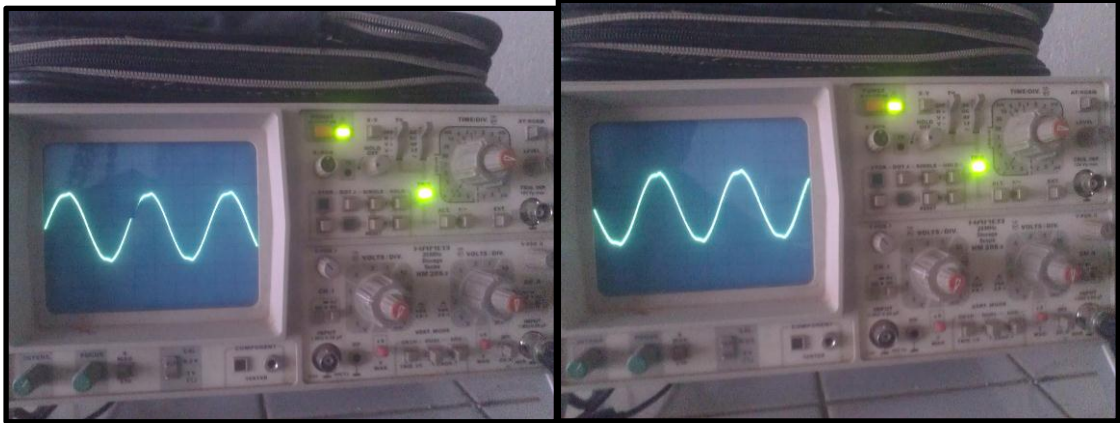
**Tableau 11 : Valeurs de la puissance apparente en fonction de la charge**

<b>Charges</b>	<b>Puissance apparente (en VA)</b>
Disjoncteur ouvert	0
Ordinateur portable	72,075
Moteur électrique	466,72
Résistance	1206,05
Résistance + Moteur électrique	1455,26

### 3.2.4 Puissance active

Cette puissance dépend de la tension instantanée et du courant instantané. Pendant notre test en charge, nous avons obtenu une valeur négative de la puissance active.

En cherchant la cause de cette partie négative, nous avons vu que c'est à cause de la polarisation du transformateur d'intensité et du transformateur de tension. Si la polarisation du capteur de courant est intervertie, la forme sinusoïdale de l'intensité instantanée est intervertie également. De plus, si en ce moment-là la polarisation du capteur de tension est dans le sens normal, la forme sinusoïdale de la tension instantanée ne change pas de signe. Cela engendre une valeur négative de la puissance puisque celle-ci est la multiplication entre les valeurs instantanées de la tension et du courant. La figure suivante illustre cette transformation :



**Figure 33 : A gauche, oscillogramme du capteur de tension. À droite, la polarisation inverse du TI**

Nous pouvons bien constater qu'en inversant la polarisation, l'intensité instantanée est également inversée. En corrigeant cette erreur, nous avons eu la valeur de la puissance active comme suit :

**Tableau 12 : Valeurs de la puissance active**

Charges	Puissance active (en Watt)
Disjoncteur ouvert	0
Ordinateur portable	32,07
Moteur électrique	270,45
Résistance	1198,56
Résistance + Moteur électrique	1429,35

### 3.2.5 Facteur de puissance

Le facteur de puissance fait partie de l'innovation qu'apporte notre système. Il est obtenu en divisant la puissance active par la puissance apparente. Ainsi, il se peut que le facteur de puissance soit négatif si la polarisation du TI est inversée. Nous avons collecté dans le tableau ci-dessous la valeur du  $\cos(\varphi)$  en fonction de la charge :

**Tableau 13 : Valeurs du facteur de puissance**

Charges	$\cos(\varphi)$
Disjoncteur ouvert	0
Ordinateur portable	0,445
Moteur électrique	0,582
Résistance	0,994
Résistance + Moteur électrique	0,982

Nous pouvons bien interpréter que le facteur de puissance varie en fonction de la charge. La valeur de la  $\cos(\varphi)$  est très proche de 1 ce qui prouve l'exactitude de notre mesure. En effet, théoriquement, pour une résistance pure, sa valeur est égale à 1. Dans la pratique, elle est approximativement égale à 1.

### 3.2.6 Énergie

La connaissance de la valeur exacte de l'énergie produite fait partie du principal objectif de ce projet. Pour la vérification de la valeur de l'énergie, nous avons utilisé une lampe ayant une puissance nominale de 100W pendant une heure. En régime normal, le résultat théorique est comme suit :

$$E = P \cdot t = 0,100 \cdot 1 = 0,100 \text{ kWh}$$

En faisant l'essai avec le système d'acquisition, nous avons obtenu le résultat suivant :

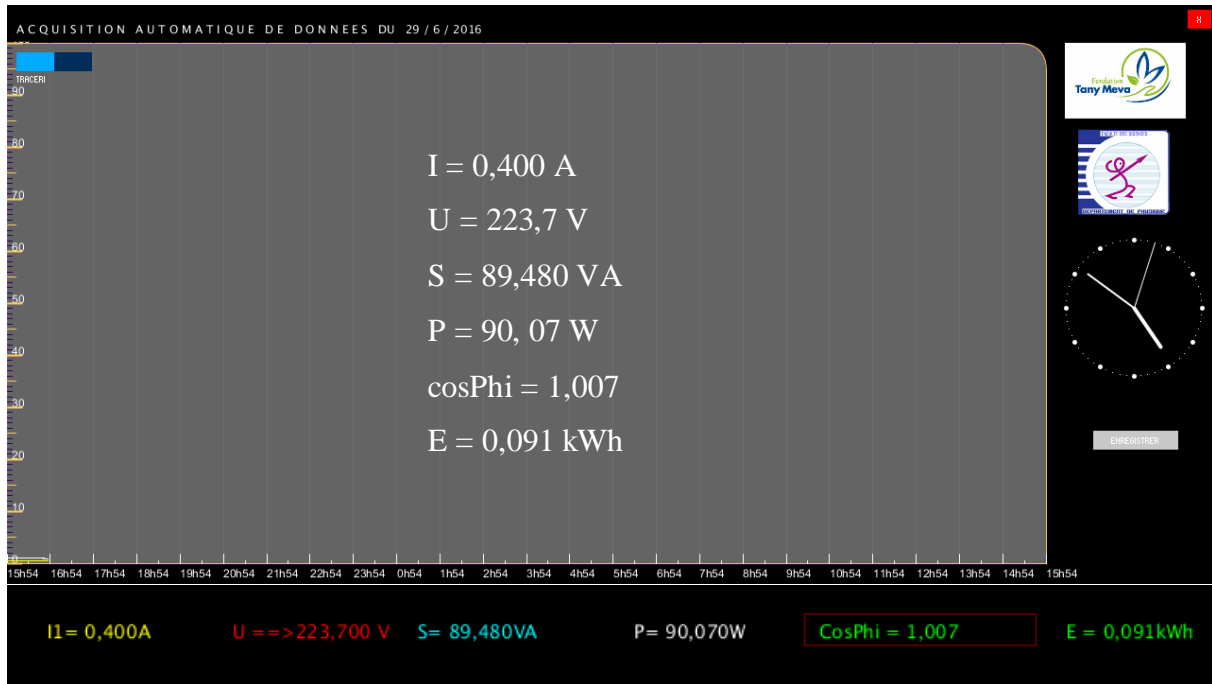


Figure 34 : Résultat du test de l'énergie consommée

Comme la tension n'est pas exactement 230V, la puissance nominale est devenue 91W. Mais nous allons nous concentrer sur la valeur de l'énergie. Après une heure d'acquisition, elle est  $E=0,091\text{kWh}$  ce qui vérifie bien la formule de l'énergie. Donc, la valeur de l'énergie est bien exacte.

### **3.3 Enregistrement des données**

Processing sert pour concevoir un logiciel permettant de faire un affichage graphique et enregistrement sur disque dur des valeurs reçues depuis la carte Arduino. Processing et Arduino établissent leur communication grâce au port série d'un ordinateur.

Au début de notre recherche sur ce projet, nous avons installé la version 2.2.1 de l'environnement Processing. Tout marchait parfaitement avec cette version jusqu'à ce qu'une faiblesse a été détectée. En effet, après l'exportation du fichier exécutable (\*.exe), ceci ne s'exécute pas correctement. L'application exportée présente un plantage.

Après avoir effectué des recherches pour résoudre ce problème, nous avons choisi d'utiliser la version 3.0. Par contre, il a fallu réapprendre toutes les modifications apportées à cette nouvelle version.

Les données sont enregistrées sous forme de courbe et de fichier numérique sur le disque dur. Nous pouvons voir un aperçu de la contenance du fichier Excel à l'annexe 2 et de la courbe à l'annexe 3.

Les données pour le fichier texte sont enregistrées dans un même fichier pour une journée. Sa taille est environ 128Ko/jour donc en une année ce fichier occupe environ 45,62Mo. En ce qui concerne le fichier image, il a une taille d'environ 2,92Mo/jour c'est-à-dire 1,04Go/an.

### **3.4 Comparaison de ce système avec le système d'acquisition de données de la MCH de Tolongoïna**

La centrale de Tolongoïna possède une version ayant les mêmes fonctionnements de base que notre système. Ce dernier a été inspiré par le système existant à Tolongoïna donc il existe des ressemblances entre ces deux systèmes sauf sur les points suivants :

- Tolongoïna ne capte que l'intensité grâce au TI, la tension est prédéfinie par le programme à 230V ;
- notre système donne la valeur du facteur de puissance ce qui est absent à la MCH de Tolongoïna
- la partie électronique est beaucoup plus simplifiée pour notre système grâce à la présence de l'Arduino

# CONCLUSION

Dans le cadre de la vente du crédit carbone, le Gestionnaire du projet PHEDER a eu besoin des valeurs efficaces exactes de la tension et de l'intensité, des puissances, du facteur de puissance et de l'énergie consommée. Face aux problèmes d'incertitude engendrée par l'enregistrement manuel de ces données, nous avons apporté une solution en concevant et en réalisant le système d'acquisition d'intensité et de tension. L'objectif de notre mission a été atteint car le fonctionnement de notre système répond aux attentes des sociétés.

Au premier essai de notre projet, il y avait quelques erreurs répertoriées sur les valeurs instantanées de la tension et du courant. Ces erreurs sont dues notamment à la conversion analogique numérique de l'Arduino, au calcul et au choix de la résistance shunt et au branchement du capteur de courant. La rectification de cela s'est effectuée grâce à la modification du programme et à la recherche de la valeur exacte de la résistance shunt. La vérification du branchement du capteur d'intensité doit être effectuée avec une grande prudence. Le plus important de la correction d'erreur est l'étalonnage avec un multimètre numérique certifié.

Pour que ce système fonctionne correctement et aie une longue durée de vie, nous recommandons de prendre en compte de sa robustesse. Il serait indispensable de bien vérifier l'étanchéité de son boîtier puisqu'il fonctionnera douze mois sur douze dans une ambiance ayant un teneur en humidité plus ou moins élevée. Durant la phase de conception, nous avons trop dépensé notre temps sur la partie de la programmation et de développement du logiciel que la partie « hardware » a été un peu délaissée.

Notre réalisation contribuera au suivi du fonctionnement d'une centrale hydroélectrique. Il contribuera non seulement à la vente des crédits carbone mais permettra également de comprendre le déphasage existant entre le courant et la tension. De plus, ce système est un outil qui peut nous aider au calcul de la perte en ligne.

En cas de coupure de courant, ce système d'acquisition s'arrêtera aussi. Cela engendre une discontinuité de l'enregistrement des valeurs au cas où l'agent ne démarrera pas à temps le logiciel. En ce qui concerne les courbes affichées sur l'écran, nous n'avions pas pu concevoir un bouton pour les afficher séparément. Elles sont affichées en même temps et cela n'est pas vraiment plaisant à voir.

Grâce aux recherches et aux études effectuées, nous avons conçu un système monophasé à titre d'essai et de projet personnel. Dans un avenir très proche, concevoir un système d'acquisition d'intensité et de tension triphasée serait très intéressant. Une

installation à la fin de la ligne de transport moyenne tension permettrait de connaître les pertes en ligne. Cela serait un atout en faisant l'enregistrement des données sur une carte SD. Si l'innovation apportée par notre système réside surtout sur l'affichage du facteur de puissance, faire sortir la valeur de la fréquence apportera pareillement une amélioration à notre projet.

Les centrales hydroélectriques sont souvent implantées dans des zones enclavées. Il apparaîtrait difficile pour les contrôleurs de faire un déplacement vers ces centrales hydroélectrique à chaque fois qu'ils auront besoin des données. Existe-t-il une méthode pour concevoir un système auxiliaire permettant de télécharger automatiquement les données sur internet sous forme de message électronique.



# RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

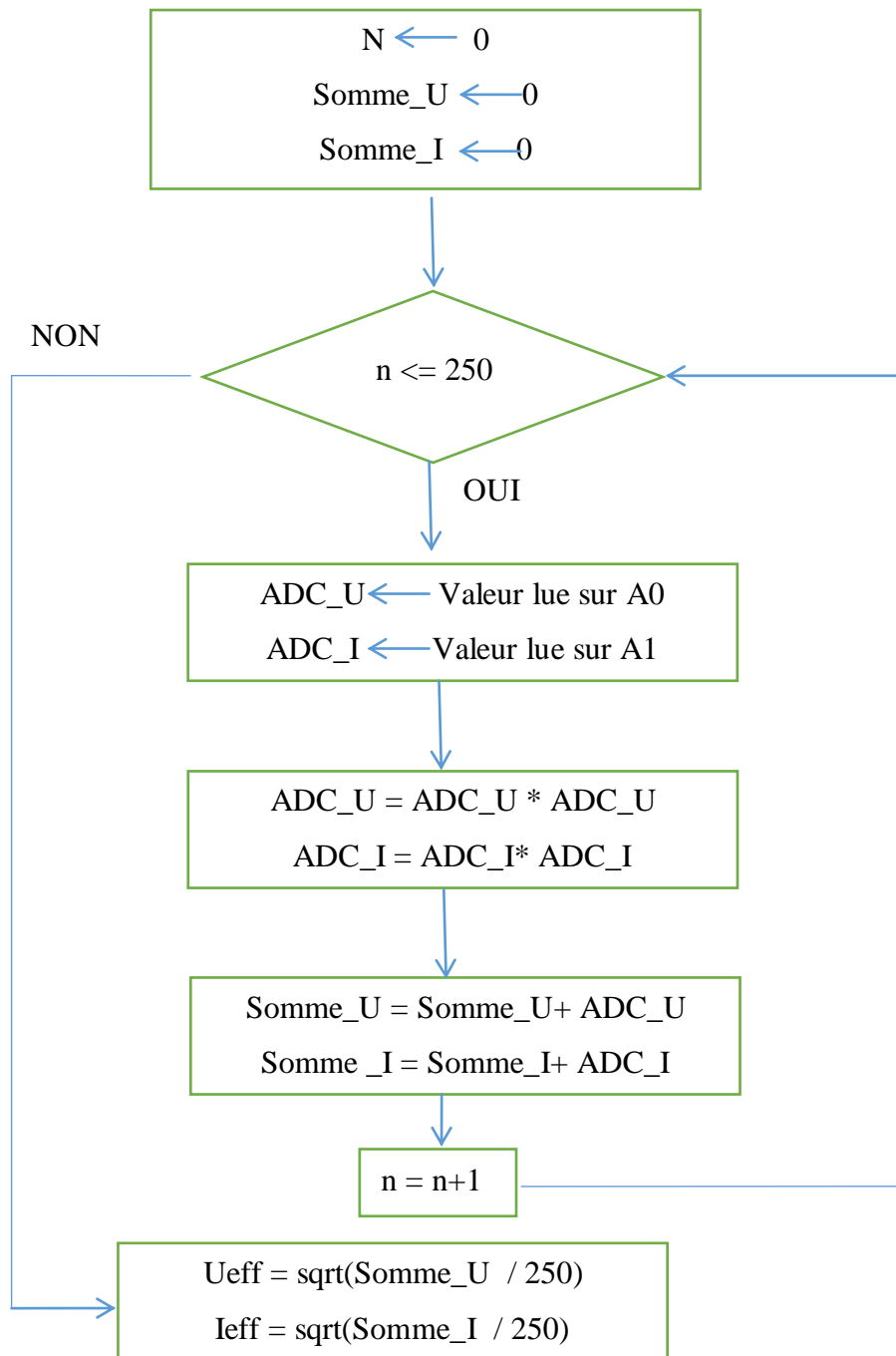
- [1] Claude CHEVASSU (juillet 2009), MACHINE ÉLECTRIQUE, cours et problèmes, 20 juillet 2012, 305 p
- [2] : ARDUINO POWER MEASUREMENT, T.PADMA PRIYANKA et al. in Electrical and Electronics Engineering, 49p
- [3] Système de suivi évaluation Pico-Hydroélectricité au service du Développement Rural – PHEDER, Séminaire Facilité Energie, 2012, 12p

## WEBOGRAPHIE

- [4] Électrification rurale : Un levier de développement socio-économique d'une région, rédaction du 13 octobre 2014, disponible sur <http://www.midi-madagasikara.mg/economie/2014/10/13/electrification-rurale-lever-developpement-socio-economique-dune-region/>, consulté le 01 juin 2016.
- [5] What is Arduino, newsletter, disponible sur <https://www.arduino.cc/en/Guide/Intoduction>, consulté le 30 avril 2016
- [6] À propos de processing, article de formation, disponible sur <http://arts-numeriques.codedrops.net/0-A-propos-de-Processing>, consulté le 30 avril 2016
- [7] Proteus (ISIS et ARES), Cours et Montages d'électroniques  
Disponible sur [www.elektronique.fr/logiciels/proteus.php](http://www.elektronique.fr/logiciels/proteus.php), consulté le 05 mai 2016
- [8] The Emulation Solution, article, Virtual Serial Ports Emulator  
Disponible sur <http://www.eterlogic.com/Products.VSPE.html>, consulté le 05 mai 2016
- [9] Explanation of the phase correction algorithm, article,  
Disponible sur <https://openenergymonitor.org/emon/buildingblocks/explanation-of-the-phase-correction-algorithm>, consulté le 05 mai 2016.

# ANNEXES

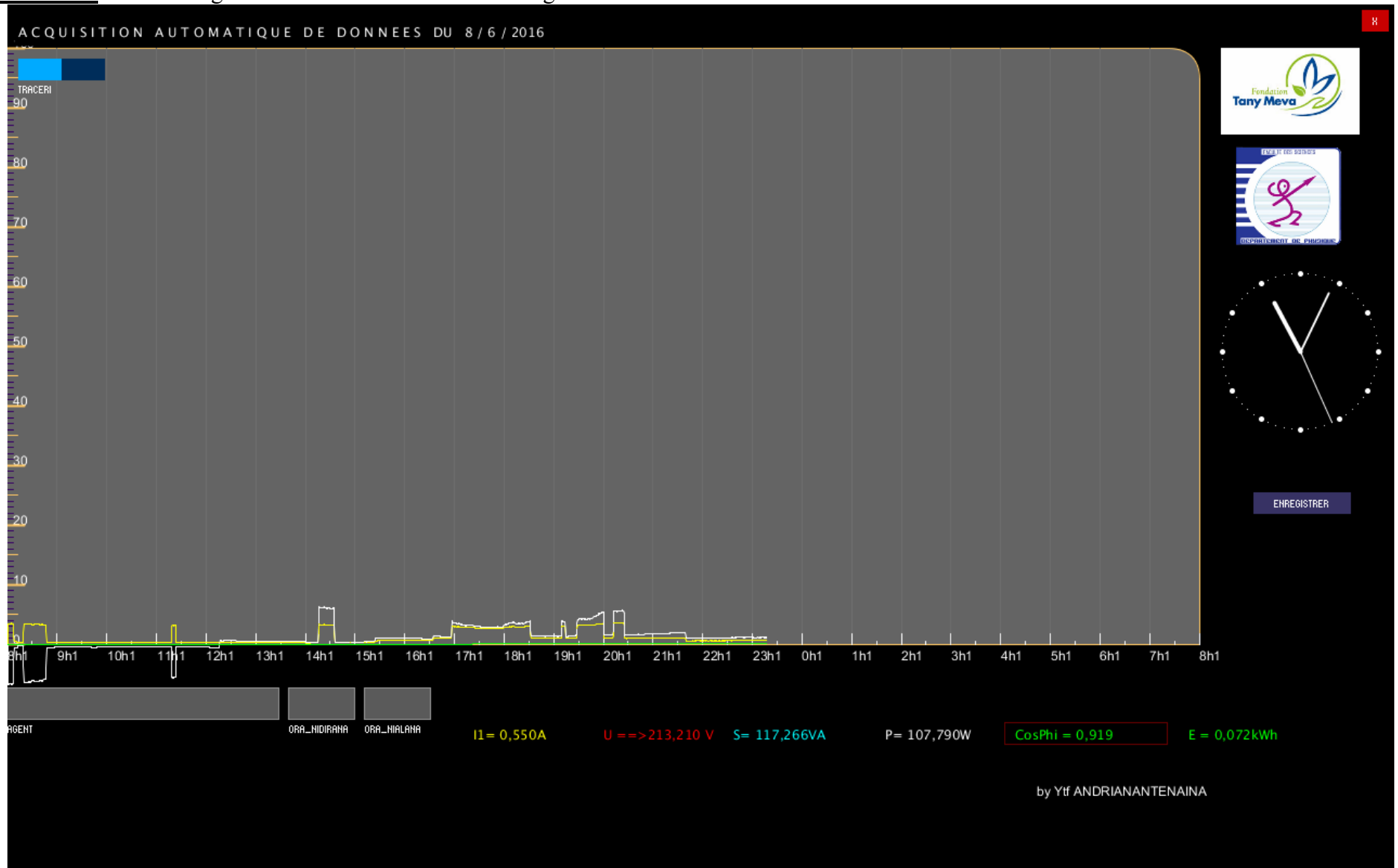
## ANNEXE 1: Organigramme pour le calcul des valeurs efficaces



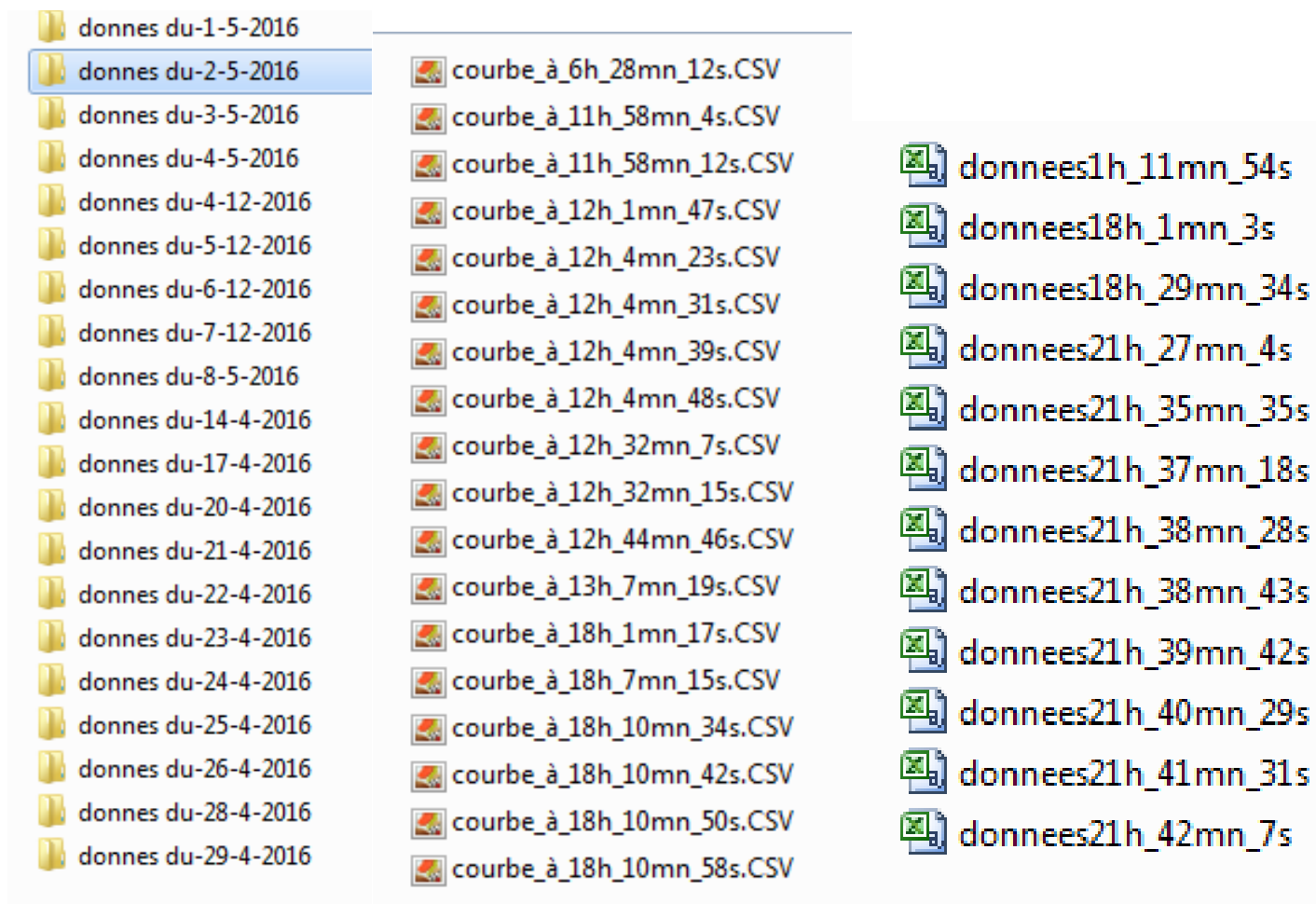
**ANNEXE 2:** Contenance du fichier d'enregistrement (\*.xls)

HEURES	TENSIONS		INTENSITE 1	INTENSITE 2	PUISSANCE APPARENTE	PUISSANCE ACTIVE	ENERGIES	CosPHI
		V	A	A		W		
16:11:08	U= 298.28		I1= 8.40	I2= -----	S= 2504.31 VA	P= 1403.95	E= 0.01 kWh	CosPhi= 0.56
		V	A	A		W		
16:11:23	U= 171.46		I1= 8.38	I2= -----	S= 1437.55 VA	P= 1434.61	E= 0.02 kWh	CosPhi= 1.00
		V	A	A		W		
16:11:38	U= 170.40		I1= 8.34	I2= -----	S= 1420.98 VA	P= 1418.83	E= 0.04 kWh	CosPhi= 1.00
		V	A	A		W		
16:11:53	U= 171.26		I1= 8.38	I2= -----	S= 1435.05 VA	P= 1432.87	E= 0.05 kWh	CosPhi= 1.00
		V	A	A		W		
16:12:08	U= 171.19		I1= 8.37	I2= -----	S= 1433.62 VA	P= 1431.45	E= 0.06 kWh	CosPhi= 1.00
		V	A	A		W		
16:12:23	U= 171.36		I1= 8.39	I2= -----	S= 1436.98 VA	P= 1434.83	E= 0.07 kWh	CosPhi= 1.00
		V	A	A		W		
16:12:39	U= 171.16		I1= 8.38	I2= -----	S= 1433.66 VA	P= 1431.55	E= 0.08 kWh	CosPhi= 1.00
		V	A	A		W		
16:12:54	U= 171.17		I1= 8.38	I2= -----	S= 1433.61 VA	P= 1431.46	E= 0.10 kWh	CosPhi= 1.00
		V	A	A		W		
16:13:09	U= 177.77		I1= 5.02	I2= -----	S= 893.27 VA	P= 888.76	E= 0.10 kWh	CosPhi= 0.99
		V	A	A		W		
16:13:24	U= 178.08		I1= 4.84	I2= -----	S= 862.74 VA	P= 859.67	E= 0.11 kWh	CosPhi= 1.00
		V	A	A		W		
16:13:39	U= 179.29		I1= 4.88	I2= -----	S= 874.67 VA	P= 871.56	E= 0.12 kWh	CosPhi= 1.00
		V	A	A		W		
16:13:54	U= 178.57		I1= 4.86	I2= -----	S= 867.39 VA	P= 864.30	E= 0.12 kWh	CosPhi= 1.00
		V	A	A		W		
16:14:09	U= 178.41		I1= 4.85	I2= -----	S= 865.85 VA	P= 862.76	E= 0.13 kWh	CosPhi= 1.00
		V	A	A		W		
16:14:24	U= 177.53		I1= 4.83	I2= -----	S= 857.45 VA	P= 854.39	E= 0.14 kWh	CosPhi= 1.00

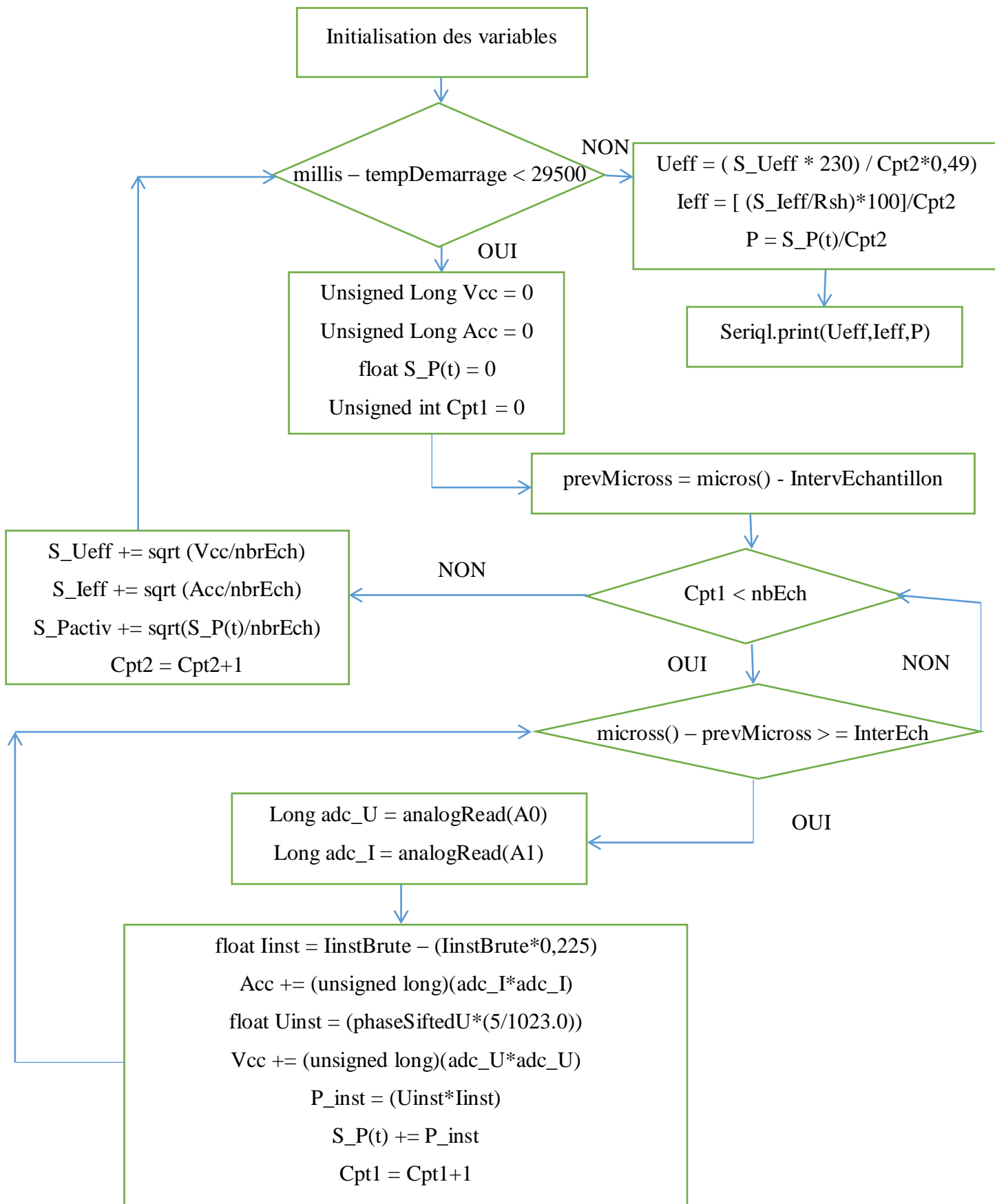
**ANNEXE 3:** Affichage des courbes sur l'interface du logiciel S.A.A.I.T.



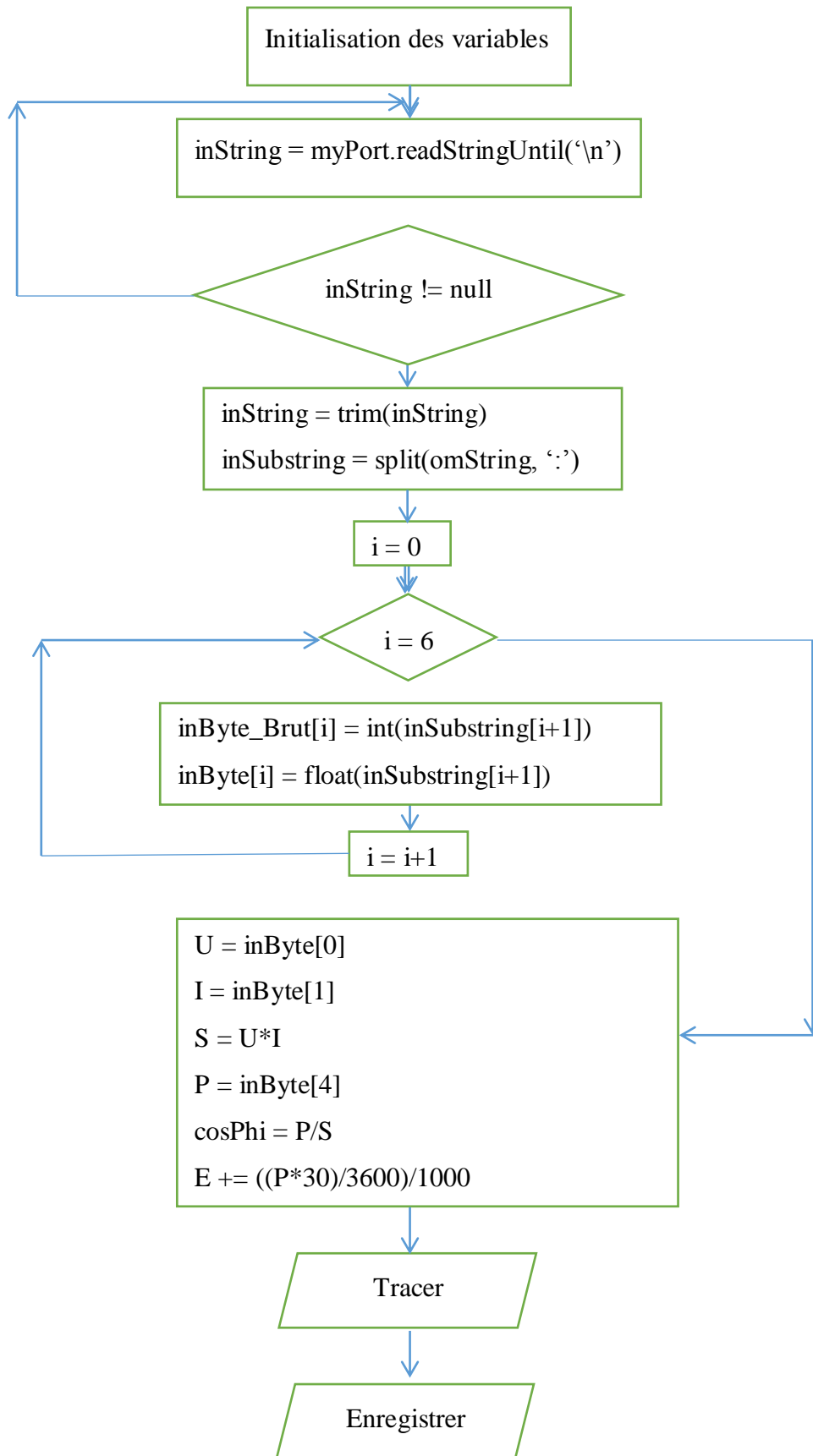
**ANNEXE 4:** Les dossiers et fichiers automatiquement enregistrés par le système. De gauche vers la droite : ils sont sous la forme de dossier, fichier image et fichier Excel



**ANNEXE 5:** Organigramme du programme Arduino



**ANNEXE 6:** Organigramme du programme Processing



**TITRE : « CONCEPTION ET RÉALISATION D'UN SYSTÈME D'ACQUISITION AUTOMATIQUE DE COURANT ET DE TENSION »**

**RESUME :**

Ce manuscrit est le fruit du stage effectué au sein du projet PHEDER dans le cadre des programmes Energy Facility II et Angovo Meva. Ce projet regroupe des pico centrales et des microcentrales hydroélectriques. Le Gestionnaire du projet a eu besoin de faire l'équivalence en tonne de carbone des énergies produites en kWh par ces PCH et MCH pour la vente du crédit carbone. On nous a demandé de mener des études et des recherches sur l'enregistrement avec précision et sans interruption des données de ces centrales. Systématiquement, des rapports relatifs aux avancements de nos travaux sont faits auprès du gestionnaire du projet. Nous avons participé à une réunion avec les permissionnaires où nous avons fait un rapport sous forme de présentation avant de répondre à leurs questions.

Pour répondre aux attentes des sociétés, des études de nouveaux logiciels, des langages de programmation (IDE arduino et processing) et des matériels (carte Arduino) ont été faites en premier lieu. Puis, nous avons lancé des simulations sous PROTEUS avant de procéder aux tests en laboratoire des capteurs de tension et de courant. Et enfin, les capteurs les mieux adaptés sont sélectionnés et testés avec la carte Arduino pour l'acquisition de données et Processing pour l'affichage et l'enregistrement sous forme de fichier numérique.

**MOTS CLES :** PHEDER, Arduino, Processing, Cos Phi, Puissances.

**ABSTRACT:**

*This document is the result of the internship that we've done in the the PHEDER project under Energy Facility II and Angovo Meva programs. This last includes pico hydropower plants and micro hydropower plants. The project manager needed the tonne carbone equivalent of energy produced by the PCH and MCH in kWh in order to sell carbon credit. We were asked to conduct studies and researches on how to record data accurately and without interruption from these plants. Systematically, we did reports related to the progress of our work. We took part in a meeting with power plants managers where we made a report as a presentation before answering their questions.*

*To meet the expectations of the companies, studies of new software, programming languages (Arduino IDE and processing) and hardware (Arduino) were made first. Then we launched in PROTEUS simulation prior to laboratory voltage and current sensors testing. And finally, the best suited sensors are selected and tested with the Arduino board for data acquisition and Processing for viewing and recording as a digital file.*

**KEYWORDS:** PHEDER, Arduino, Processing, CosPhi, Powers.

**Lieu de stage : PHEDER (TanyMeva) Impétrant :**

**ANDRIANANTENAINA** Herinirina Fitiavana R.

**Tél. :** +261 34 15 179 79

**E-mail :** ftyandri@yahoo.fr

**Adresse :** Lot VS 52 GH Ter Avaratra Ankatso