

RÉPUBLIQUE ALGÉRIENNE DÉMOCRATIQUE ET POPULAIRE
MINISTÈRE DE L'ENSEIGNEMENT SUPÉRIEUR ET DE LA RECHERCHE
SCIENTIFIQUE
UNIVERSITÉ IBN-KHALDOUN DE TIARET
FACULTÉ DES SCIENCES APPLIQUÉES
DÉPARTEMENT DE GENIE ÉLECTRIQUE



MÉMOIRE DE FIN D'ÉTUDES

Pour l'obtention du diplôme de Master
Domaine : Sciences et Technologie
Filière : Electronique
Spécialité : Electronique des systèmes embarqués

THÈME

**Etude et réalisation d'un compteur d'énergie
électrique basé sur microcontrôleur (1275)**

Préparé par :

Boumediene Mohamed Akram

Devant le Jury :

<i>Nom et prénoms</i>	<i>Grade</i>	<i>Qualité</i>
M. BELARBI	MCA	Examineur
N. MAAMAR	MCB	Président
A. CHEBBAH	Ingénieur principale de recherche SONELGAZ	Invité
D. NASRI	Prof	Encadrant
M. SEBAA	Prof	Co-encadrant
I.BEKHEIRA	Enseignante CDE Tiaret	Examineur

Année universitaire : 2024/2025

Remerciements

Avant toute chose, je rends grâce à Allah, le Tout-Puissant, pour m'avoir accordé la force, la persévérance et la patience nécessaires à l'accomplissement de ce travail dans les meilleures conditions.

Je tiens à exprimer ma profonde gratitude à mon encadreur, **Monsieur Djilali Nasri**, pour la confiance qu'il m'a accordée, la pertinence du thème qu'il m'a proposé, ainsi que pour ses remarques constructives qui m'ont permis d'élargir mes connaissances et de progresser tout au long de ce projet.

Je remercie sincèrement **Monsieur Morseli Sebaa** pour leur disponibilité, leurs précieux conseils et l'accompagnement qu'ils m'ont offert tout au long de cette expérience.

Ma reconnaissance va aussi à mes parents, pour leur soutien inconditionnel, leur patience et leurs encouragements constants.

Enfin, je remercie chaleureusement mes ami(e)s, dont le soutien et la présence m'ont été d'un grand réconfort durant les moments de doute et de difficulté.

Dédicaces

Mes parents.

Mes frères et sœurs.

Et tout (es) mes amis.

Table des matières

1	Introduction :	1
2	Compteurs d'énergie classiques vs. intelligents :	1
2.1	Compteur d'énergie Classique :	1
3	Le principe de fonctionnement et la conception :	2
4	Les avantages et les inconvénients d'un compteur électromécanique (Classique) :	3
4.1	Compteur d'énergie intelligent :	4
4.1.1	Principe de fonctionnement :	4
4.1.2	Conception technique :	5
4.2	Compteur d'énergie électronique :	6
5	Conclusion :	7
1	Circuit monophasé :	11
1.1	Caractéristiques du Circuit Monophasé :	11
1.1.1	Composition :	11
1.1.2	Tension et Fréquence :	11
1.1.3	Utilisation :	11
1.1.4	Avantages et Inconvénients :	12
2	Fondements théoriques	12
2.1	Puissance électrique :	12
2.2	Puissance active	12
2.3	Puissance réactive :	14
2.4	La puissance apparente :	15
2.5	Le facteur de puissance :	16
3	Énergie électrique :	17
1	Introduction :	20

2	Fonctionnement général du compteur intelligent :	20
3	Comment les compteurs intelligents envoient-ils des données :	20
3.1	Communication par ligne électrique (PLC) :	21
3.2	Communication IOT :	21
4	Principe de communication sans fil :	22
4.1	Définition de la communication sans fil :	22
4.2	Différents types de technologies sans fil :	22
5	le Wi-Fi :	23
5.1	Le réseau local sans fil (WLAN) :	23
5.2	point d'accès :	23
6	Le compteur d'énergie intelligent WiFi :	24
6.1	Principe de fonctionnement :	24
7	Conclusion	25
1	Présentation du PIC16F877 : Caractéristiques et applications	27
1.1	Caractéristiques de base du PIC	27
1.2	Ports du PIC16F877	28
1.3	Applications du PIC16F877A	30
2	Convertisseur analogique-numérique (ADC)	30
2.1	Configuration du module ADC	31
2.2	Le registre de contrôle ADCON1 :	32
2.3	Étapes pour Lire une Valeur Analogique	32
3	Configuration du module TIMR1	33
3.1	Caractéristiques principales du TMR1	33
3.2	Configuration du TMR1	33
4	Présentation du ESP32 : Caractéristiques et applications	34
4.1	Caractéristiques principales de l'ESP32 :	34

4.2	Convertiseur analogique numérique dans ESP32 :	35
5	Les Capteurs utilisées :	37
5.1	Définition détaillée des capteurs LEM	37
5.2	Technologies principales utilisées par LEM :	37
5.2.1	Capteurs à Boucle Ouverte	37
5.2.2	Capteurs à Boucle Fermée	38
5.2.3	Transducteurs à Effet Hall avec Technologie Eta	38
6	LEM LV 25-P :	39
6.1	Caractéristiques	39
6.2	Principe de Fonctionnement	39
7	LEM LA 25-P	40
7.1	Spécificités Techniques	41
8	LCD :	42
8.1	Principes de base dun écran LCD	42
8.2	Fonctionnement	43
9	Visual Studio Code :	43
10	ThingSpeak :	44
11	MPLAB IDE :	44
11.1	Caractéristiques de MPLAB X	45
12	Arduino IDE :	45
13	Proteus :	48
1	Introduction	51
2	Schéma synoptique du compteur intelligent :	51
3	Méthodes de mesure dans un compteur d'énergie intelligent :	52

3.1	Mesure de tension et de courant :	52
3.2	Fonctionnement de la mesure de tension et courant :	52
3.2.1	Capteur de tension :	52
3.2.2	Capteur de courant :	52
3.3	Convertir en valeur efficace :	53
3.4	Mesure du facteur de puissance :	54
3.4.1	Le détecteur de passage par zéro :	54
3.4.2	Principe de fonctionnement :	55
3.5	calculer l'énergie consommée :	56
4	Protocole de communication :	57
4.1	Communication de ESP32 sans internet :	57
4.2	Communication de ESP32 avec Internet	59
4.2.1	Création d'un compte sur la plateforme en ligne Thingspeak :	59
5	La réalisation pratique :	61
5.1	Le schéma global du compteur d'énergie intelligent sous proteus (version du pic16f877) :	61
5.2	Le schéma global du compteur d'énergie intelligent sous proteus (version ESP32) :	63
6	Réalisation pratique :	65

Table des figures

Figure I.1 – Compteur électromécanique	1
Figure I.2 – Compteur électromécanique	2
Figure I.2 – Compteur électromécanique	4
Figure I.4 – Compteur d'énergie électronique	7
Figure II.5 – Installation électrique monophasé	10
Figure II.5 – Le triangle de puissance	16
Figure III.7 – illustration du principe général du CPL	21
Figure III.8 – illustration du principe général du IOT	21
Figure IV.9 –PIC16F877	27
Figure IV.10 – PIC16F877 ports	29
Figure IV.11 – convertisseur analogique numérique	30
Figure IV.12 – Configuration des registres ADCON0/ADCON1	31
Figure IV.13 – ADCON1	32
Figure IV.14 – VisualiModule ESP32	34
Figure IV.15 –Brochage du ESP32	36
Figure IV.15 –Brochage du ESP32	36
Figure IV.16 – LEM	37
Figure IV.17 – capteur à effet Hall	38
Figure IV.18 – LV 25-P	39
Figure IV.21 – LCD 16x2	42
Figure IV.22 – VS Code	43
Figure IV.23 –ThingSpeak	44
Figure V.25 – MPLAB IDE	44
Figure IV.26 – Arduino IDE	46
Figure IV.27 – Proteus	48
Figure V.28 – Schéma synoptique du compteur intelligent	51
Figure V.29 – Bloque de capteurs	53
Figure V.30 – Simulation du circuit avec IAD736 dans Proteus	54
Figure V.32 – Détecteur de passage par zéro	55
Figure V.33 – Détecteur de passage par zéro (circuit imprimée	56
Figure V.34 – Liste des réseaux disponibles	57

Figure V.35 – l’adresse IP	58
Figure V.36 – Interface utilisateur	58
Figure V.37 – Protocole de communication	59
Figure V.38 – Interface utilisateur	60
Figure V.39 – Configuration du code	61
Figure V.40 – Le schéma global (PIC16F877)	62
Figure V.41 – Virtual Terminal	62
Figure V.42 – Le schéma global	63
Figure V.43 – Le schéma global	64
Figure V.44 – Visualisation sur Oscilloscope	64
Figure V.45 –Réalisation pratique d’un compteur d’énergie(PIC16F877)	65
Figure V.46 –Réalisation pratique d’un compteur d’énergie (ESP32)	66

Introduction Générale :

Dans le contexte actuel où l'efficacité énergétique est important, comprendre et améliorer Les installations électriques constituent un enjeu majeur.. L'étude théorique des mesures de courant et tension dans ces installations permet d'analyser les paramètres fondamentaux tels que la puissance active, la puissance réactive et le cosinus du déphasage ($\cos()$), mais aussi dépréciation l'énergie consommée. Ces éléments sont essentiels pour garantir une bonne utilisation de l'énergie électrique pour minimiser les pertes.

Pour effectuer les calculs théoriques, nous devons utiliser des outils de simulation comme Proteus. Cette simulation numérique permettra de prédire le performances et le comportement réel du système avant sa mise en uvre effective. Une fois réalisé physiquement, le projet sera suivi par une phase d'amélioration qui se concentrera sur la lecture à distance de l'énergie consommée. Cette fonctionnalité est particulièrement importante car elle permettra aux gestionnaires ou utilisateurs finaux d'avoir un contrôle précis sur leur consommation énergétique sans avoir besoin d'interventions physiques directes

Ce projet vise donc à combiner savoir-faire technique avec innovation technologique pour pour garantir une utilisation efficace de l'énergie électrique et une solution durable dans le domaine électrique.

Cette introduction générale met en évidence les principaux aspects du projet : analyse théorique, vérification par simulation (Proteus) et mise en uvre pratique suivie d'une optimisation basée sur une technologie moderne (relecture à distance).

chapitre 1 : Dans ce chapitre, il est question de l'évolution des systèmes de mesure de Cette section étudie comparativement trois types de compteurs, à savoir, le compteur électromécanique, le compteur électronique et le compteur communicant ou intelligent. À travers cette comparaison, nous voulons illustrer une évolution vers des systèmes plus performants et sophistiqués, à la fois plus précis, communicants et automatisés

chapitre 2 : Les différentes puissances relatives à des circuits électriques sont exposées en première partie : active (notée P), réactive (notée Q) et apparente (notée S), et sont liées par le facteur de puissance. On apprend comment estimer l'énergie consommée, et quelles sont les modalités pour mesurer la tension et le courant à l'intérieur du compteur dans le cas d'un compteur intelligent. On utilise les capteurs Hall, le module LEM LV25-P pour la tension et le LEM LA25-P pour le courant, tandis que les méthodes de conversion en valeur efficace sont constituées par l'utilisation d'un AD736 ou celle d'un redresseur parfait basé sur un AOP. La mesure du facteur de puissance s'appuie sur la mesure du passage par zéro.

chapitre 3 : Les compteurs intelligents permettant la mesure de l'énergie en temps réel et la transmission des données, cela via le courant porteur de ligne (CPL), le Wi-Fi ou encore le Bluetooth : Le Wi-Fi permettant d'avoir accès à distance à la mesure, et le Bluetooth permettant une connexion simple sans le recours à Internet. Ils permettent ainsi d'optimiser la gestion en matière de factures d'énergie et d'efficacité énergétique.

Chapitre I

Généralités sur les compteurs
d'énergie électrique

1 Introduction :

L'avancement des systèmes de mesure électrique est un étape essentiel de la transmission énergétique. Cette partie du mémoire propose les différentes technologies existantes dans le domaine de la mesure de la consommation énergétique. Elle débute par une mise en parallèle des compteurs d'énergie conventionnels et des compteurs intelligents, puis expose les technologies de communication principales employées, les réglementations existantes, ainsi que quelques illustrations de systèmes déjà mis en place, avant de finir sur les contraintes actuelles

2 Compteurs d'énergie classiques vs. intelligents :

2.1 Compteur d'énergie Classique :

Un compteur d'énergie électrique, parfois appelé compteur d'électricité ou simplement compteur électrique, est un équipement électrique conçu pour quantifier la quantité d'énergie électrique utilisée dans divers lieux, tels que les résidences ou les sites industriels. Les fournisseurs d'électricité l'utilisent pour établir la facturation de l'énergie consommée au client. Initialement, ces appareils étaient conçus de manière électromécanique, mais ils sont désormais progressivement remplacés par des versions électroniques. Les compteurs électriques récents, souvent nommés compteurs intelligents, sont des dispositifs communicants[1]



Figure I.1 – Compteur électromécanique [1]

3 Le principe de fonctionnement et la conception :

Les éléments essentiels et principaux du compteur sont visibles à travers le capot transparent à savoir :

- (A) L'inducteur à Intensité est constitué par quelques spires de gros fil.
- (B) L'inducteur à Tension est constitué par une bobine comportant un grand nombre de spires de fil fin.
- (C) Le disque en aluminium constituant le rotor.
- (D) L'aimant de freinage.
- (E) Le totaliseur d'énergie constitué d'un ensemble d'engrenages qui actionne un dispositif d'affichage. [2]

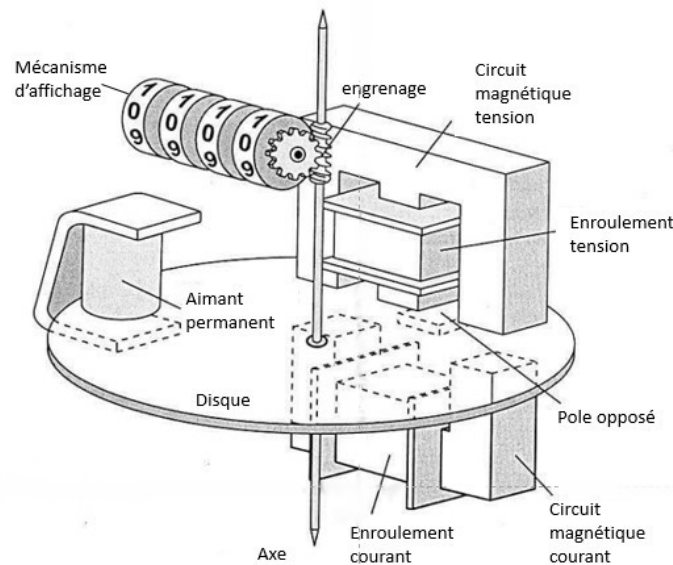


Figure I.2 – Compteur électromécanique [2]

4 Les avantages et les inconvénients d'un compteur électromécanique (Classique) :

a- Les avantages :

- Ce type de compteur est le plus ancien des affichages mécaniques, il présente l'avantage de :
 - Haute fiabilité lors de la coupure de courant et même en cas de court-circuit, ils peuvent continuer à fonctionner après avoir éliminé toutes les conséquences.
 - Convient aux réseaux de faible qualité.
 - Le prix d'achat est inférieur aux prix des appareils électroniques.
 - Pas besoin de configuration supplémentaire. Tout ce qui est nécessaire est le câblage correct.
 - De plus, en cas de détérioration ou de vandalisme, la dernière formation enregistrée reste affichée, ce qui rend sa lecture toujours possible.
 - Longue durée de vie grâce à sa grande robustesse et sa grande qualité.
 - Sa facilité d'installation et d'utilisation.

b- Les inconvénients :

- Tandis que ce compteur électromécanique procure à leurs utilisateurs une foule d'avantages, il leur pose aussi des inconvénients et des problèmes comme :
 - Précision réduite avec consommation réduite, due à une diminution du champ électromagnétique.
 - Petite classe de précision, ne dépassant pas une valeur de 2 unités.
 - Défaillances de suivi avec une forte variation des courants de charge.
 - Coefficient élevé de consommation intérieure : le compteur influence partiellement

ment la quantité d'électricité reçue.

— Dimensions relativement grandes.

C'est pour cela que la technologie a évolué et que les compteurs numériques sont apparus. Il est très aisé de les programmer pour compter l' électricité prélevée ou injectée dans le réseau.

4.1 Compteur d'énergie intelligent :

Le compteur intelligent, également connu sous le nom de compteur communicant, est un appareil qui permet de surveiller précisément et en temps réel la consommation d'électricité d'un édifice, d'une société ou d'un foyer. Les compteurs intelligents, également appelés smart meters, envoient leurs informations au gestionnaire du réseau de distribution.[3]



Figure I.2 – Compteur intelligent [2]

4.1.1 Principe de fonctionnement :

a- Mesure électronique de l'énergie :

— Le compteur intelligent s'appuie sur des détecteurs de tension et d'intensité pour évaluer en direct la consommation et parfois la génération d'énergie (électricité,

gaz, etc.). Ces actions sont transformées en informations numériques exactes, à la différence des appareils électromécaniques classiques qui se servaient d'un disque tournant.

b- Stockage et traitement des données :

- Pour stocker les données mesurées, il utilisera une mémoire interne. De plus, l'appareil sera en mesure de garder une trace de la consommation à certains moments de la journée et sur différents indicateurs.

c- Communication bidirectionnelle :

- En outre, le compteur sera équipé d'un module de communication via lequel le compteur transmettra automatiquement des informations pour la comptabilité au propriétaire du réseau.[4]

4.1.2 Conception technique :

a- Les Capteurs de mesure :

- Compte tenu de ces exigences, les éléments constitutifs du dispositif sont les capteurs électroniques de tension et de courant pour une mesure précise des flux énergétiques.

b- Microcontrôleur :

- Un microcontrôleur ESP32 ou Pic16F877 est chargé du traitement des données émises par les capteurs, calcul de la consommation, la mémoire, ainsi que le contrôle

des communications.[5]

c- Interface utilisateur :

- Un écran LCD présente les informations clés (indice de consommation, alertes) et un bouton offre la possibilité de parcourir les données
- un siteweb sur le smartphone ou bien l'ordinateur.

d- Architecture système :

- Le compteur peut contenir plusieurs circuits imprimés, tels qu'une carte d'acquisition (microcontrôleur) pour effectuer les opérations complexes et assurer la liaison avec le réseau.

La conception et le principe du fonctionnement d'un compteur intelligent d'énergie varie d'un compteur à l'autre ça dépend du protocole de communication et du nombre des fonctionnalités.

Il existe également un autre type de compteur qui n'est pas aussi avancé que le compteur intelligent et pas aussi ancien que le compteur traditionnel.

4.2 Compteur d'énergie électronique :

Un compteur d'énergie électronique est un appareil de mesure de la consommation électrique, qui a été conçu pour remplacer les anciens compteurs électromécaniques à disque tournant, apparu déjà dans les années 1950 mais encore marginal jusqu'à la généralisation à

partir des années 1990, où une fonction de lecture numérique a permis d'enfin proposer une solutions plus précise et plus pratique.[6]



Figure I.4 – Compteur d'énergie électronique [4]

5 Conclusion :

L'évolution des compteurs d'énergie illustre bien la transformation progressive des systèmes de mesure électrique vers les solutions plus précises, plus intelligentes, plus connectées. Les compteurs électromécaniques qui ont longtemps solidement effectué l'objet d'un service fiable, se défaisaient de leur service côté fiabilité par leur manque de précision ou le manque de souplesse face à la modernité naissante des systèmes : les compteurs électroniques ont alors pris le relè des électromécaniques, puis les compteurs intelligents sont apparus en même temps que la montée en puissance des systèmes informatiques. Équipés de capteurs, de circuits électroniques de traitement d'information ou de microprocesseur, de modules de communication vers les équipements de communication des distributeurs d'électricité, les compteurs intelligents permettent à la fois un meilleur service sur toutes les dimensions de la mesure, y compris en rapport de temps réel, et plus d'interaction avec les systèmes de

gestion énergétique et la modernité numérique qui déferle aujourd'hui tant il est vrai que la numérisation de l'énergie avec tous les renouvelables et le développement des algorithmes et des données, constitue une des colonnes du nouveau modèle économique des services énergétiques intégrés à la gestion de l'information ; d'où le droit à l'évolution des compteurs d'énergie en tant qu'éléments parmi d'autres dans la transition vers les énergies renouvelables et les réseaux intelligents de demain.

Chapitre II.

puissance et énergie électrique

Introduction :

Dans un circuit électrique, la puissance est une mesure important pour découvrir l'efficacité et la consommation d'énergie. Il avoir trois types de puissances principales : la puissance active (P) qui représente l'énergie réellement consommée par les appareils , la puissance réactive (Q) qui est liée aux éléments inductifs et capacitifs du circuit et la puissance apparente (S) qui est la combinaison vectorielle des deux précédentes

L'énergie consommée par un circuit électrique est le produit de la puissance par le temps, et est exprimée en kilowattheures (kWh), le calcul de la consommation nous permet de connaitre le cout des appareils électriques consommés en énergie.

Cette introduction fournit une brève explication de chaque type d' énergie présent dans un circuit électrique ainsi que leurs définitions mathématiques de base.

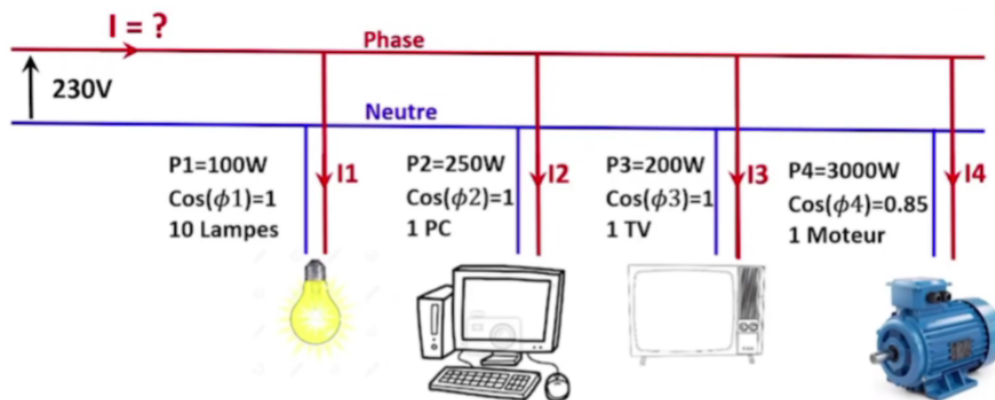


Figure II.5 – Installation électrique monophasé [5]

1 Circuit monophasé :

Le circuit monophasé, tel qu'illustré, se compose d'une seule phase (habituellement rouge), d'un neutre (bleu) et d'un conducteur de terre. Cette installation fonctionne sous une tension de 230 V et le cumul de la puissance des appareils branchés est limité à celle du compteur électrique. Le monophasé est amplement suffisant pour assurer les besoins en électricité d'une famille classique : éclairage, chauffage, alimentation des divers appareils électriques. [7]

1.1 Caractéristiques du Circuit Monophasé :

1.1.1 Composition :

- **Réseau électrique pour l'alimentation**
- **Phase (L)** : Transporte le courant alternatif.
- **Neutre (N)** : Assure la répartition, le retour de courant au générateur et la sécurité.
- **Conducteur de Terre (Charge)** : Protège contre les haute tension

1.1.2 Tension et Fréquence :

- **Tension** : 220 jusqu'à 230 volts en Europe entre phase et neutre
- **Fréquence** : 50 Hz dans la majorité des pays européens.

1.1.3 Utilisation :

- **Applications domestiques** : comme l'éclairage ou le chauffage et les appareils Ménagers.

- **Utilisation Commerciale** : pour les besoin électriques ne nécessitent pas une grande énergie comme les petites magasins.[8]

1.1.4 Avantages et Inconvénients :

- **Avantages** : Les installations monophasés sont simples et moins couteuse que les circuits triphasés
- **Inconvénients** : Limitations en termes d' énergie disponible ; Ne convient pas à l'exploitation d'équipements industriels à forte consommation d'énergie.

2 Fondements théoriques

2.1 Puissance électrique :

La puissance électrique instantanée $p(t)$ est donnée par le produit de la tension et du courant à un instant donné

$$P(t) = U(t) \times I(t) \quad (1)$$

2.2 Puissance active

C'est la représentation réel de la puissance consommée par le circuit électrique en courant alternatif (AC) pour produire un travail utile ou bien représente l'énergie réellement consommée par les appareils comme le chauffage, l'éclairage ou le fonctionnement d'un moteur. Elle est mesurée en watts (W). donnée par la formule :

$$P = U \times I \times \cos(\varphi) \quad (2)$$

Ou :

- **U** : La tension efficace en volts (V),
- **I** : Le courant efficace en ampères (A),
- **cos**(φ) : Le déphasage entre la tension et le courant (facteur de puissance).

Ceci est également valable pour un système à courant alternatif, mais la tension et le courant dépendent du temps, de sorte que la puissance dépend également du temps. La puissance réelle instantanée à chaque instant est donc donnée par :

$$P(t) = U(t) \times I(t) \quad (3)$$

nous ne intéressons pas à la puissance instantanée qu'il consomme mais à la puissance moyenne dans le temps. Nous pouvons calculer cela avec :

$$P = \lim_{t \rightarrow \infty} \frac{1}{t} \int_0^t u(t) \cdot i(t) dt \quad (4)$$

La puissance active est la puissance réelle utilisée par les appareils. Parfois également appelée puissance active car c'est la puissance qui effectue activement le travail.

Si les propriétés de l'appareil sont statiques dans le temps et que nous appliquons un signal périodique de période T, le courant sera également périodique de période T. Cela signifie que nous pouvons déterminer la puissance moyenne sur une période.

$$P = \lim_{t \rightarrow \infty} \frac{1}{T} \int_0^T u(t) \cdot i(t) dt \quad (5)$$

Pour une charge résistive, son courant est en phase avec la tension. Nous pouvons décrire la tension et le courant nets d'une charge résistive dans le temps avec :

$$u(t) = U_{\max} \sin(\omega t) \quad (6)$$

$$i(t) = I_{\max} \sin(\omega t) \quad (7)$$

Avec des valeurs efficaces de :

$$U_{\text{RMS}} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T [v(t)]^2 dt} = U_{\max} \cdot \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T \sin^2(\omega t) dt} = \frac{U_{\max}}{\sqrt{2}}$$

$$I_{\text{RMS}} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T [i(t)]^2 dt} = I_{\max} \cdot \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T \sin^2(\omega t) dt} = \frac{I_{\max}}{\sqrt{2}}$$

Si nous utilisons la représentation temporelle de $u(t)$ et $i(t)$:

$$P_{\text{moy}} = U_{\text{RMS}} \times I_{\text{RMS}} \times \cos(\varphi) \quad (8)$$

[9]

2.3 Puissance réactive :

La puissance réactive fait référence à l'énergie électrique qui circule entre le phase et le neutre d'un réseau monophasé, mais n'est pas capable d'effectuer un travail mécanique. Elle est mesurée en unités volt-ampère-réactives (VAR).

$$Q = U \times I \times \sin(\varphi) \quad (1)$$

c'est l'écart entre le pouvoir réel et le pouvoir apparent. La puissance réactive est une mesure de la quantité de puissance transportée dans les deux sens entre la source et l'appareil sans être transformée en travail. Étant donné que la puissance réelle et la puissance apparente sont des vecteurs

$$Q = \sqrt{S^2 - P^2} \quad (2)$$

- **U** : La tension efficace en volts (V),
- **I** : Le courant efficace en ampères (A),
- (φ) : est l'angle de déphasage entre le courant et la tension.[9]

2.4 La puissance apparente :

il s'agit de la puissance totale fournie par la source d'énergie, qui comprend à la fois la puissance active (pour effectuer un travail utile) et la puissance réactive (qui ne contribue pas directement au travail mécanique). Elle est mesurée en voltampères (VA) ou en kilovoltampères (kVA).

$$S = U \times I \quad (1)$$

- **S** : est la puissance apparente.
 - **U** : La tension efficace en volts (V),
 - **I** : L'intensité du courant efficace en ampères (A),
- aussi c'est la somme vectorielle de la puissance active et réactive :

$$S = \sqrt{P^2 + -Q^2} \quad (2)$$

La puissance apparente est essentielle pour déterminer la puissance maximale d'un système électrique et la taille des équipements électriques.[10]

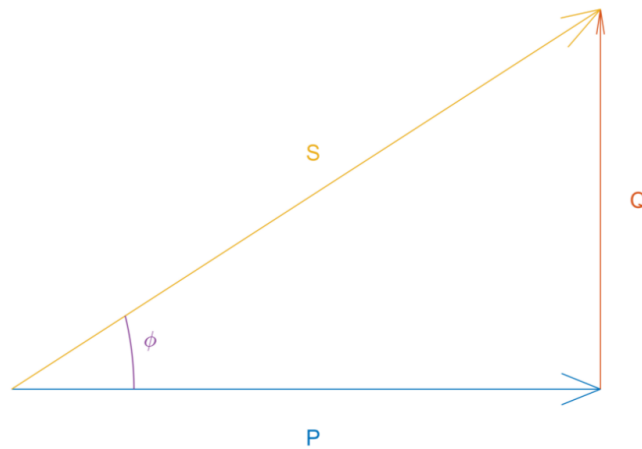


Figure II.6 – Le triangle de puissance [6]

2.5 Le facteur de puissance :

Le facteur de puissance dans un circuit monophasé c'est le résultat qui indique l'efficacité avec laquelle de la consommation d'une charge électrique de la puissance active par rapport à la puissance apparente.

Donc c'est le rapport entre la puissance active et la puissance apparente. Il est donné par.

$$\text{Facteur de puissance} = \frac{\text{Puissance active (W)}}{\text{Puissance apparente (VA)}} \quad (1)$$

Donc :

$$FP = \frac{P}{S} \quad (2)$$

Lorsque le courant est déphasé de φ par rapport à la tension. Un φ positif signifie que le courant est en avance sur la tension (charge capacitive) et un φ négatif signifie que le courant est en retard sur la tension (charge inductive). [9]

$$P_{\text{moy}} = U_{\text{eff}} \times I_{\text{eff}} \times \cos(\varphi) \quad (3)$$

Donc :

$$FP = \frac{P}{S} = \frac{U_{\text{eff}} \cdot I_{\text{eff}} \cdot \cos(\varphi)}{U_{\text{eff}} \cdot I_{\text{eff}}} = \cos(\varphi) \quad (4)$$

3 Énergie électrique :

.

L'énergie électrique consommée correspond à la quantité d'énergie utilisée dans un lieu ou une installation, ou absorbée par un système, un appareil, etc., durant une période donnée. Elle est le plus souvent en kWh qui est l'unité de consommation d'électricité la plus répandue et qui correspond en général à l'utilisation d'électricité d'un foyer ou d'une industrie[11]

$$E = P_{\text{moy}} \cdot t$$

où :

- E est l'énergie consommée (en joules J ou en wattheures Wh),
- P_{moy} est la puissance moyenne (ou active),

— t est le temps (en secondes pour J , ou en heures pour Wh).

Dans un circuit sinusoïdal :

$$P_{\text{moy}} = V_{\text{RMS}} \cdot I_{\text{RMS}} \cdot \cos(\varphi)$$

Donc, l'énergie consommée devient :

$$E = V_{\text{RMS}} \cdot I_{\text{RMS}} \cdot \cos(\varphi) \cdot t$$

Chapitre III.

Les Technologies de
Communication
dans les Compteurs d'Énergie
Intelligents

1 Introduction :

A une époque où la consommation et l'efficacité énergétiques sont devenues des préoccupations majeures, les compteurs intelligents sont apparus comme une solution innovante pour gérer plus efficacement la mesure justifiée, instantanée, et une restitution automatique des données traitées. Cette innovation s'intègre dans un contexte de transition énergétique favorisant l'optimisation des réseaux et la responsabilisation des consommateurs.

2 Fonctionnement général du compteur intelligent :

Le compteur dit intelligent est capable de mesurer la consommation électrique selon le moment de la journée et de mémoriser l'information dans sa mémoire interne. Il peut mesurer à la fois non seulement la quantité d'énergie consommée mais aussi pouvoir évaluer des valeurs telles que la puissance instantanée (par exemple), des périodes de fort engagement, et parfois la production d'énergie en cas d'installation de panneaux photovoltaïques.[12]

3 Comment les compteurs intelligents envoient-ils des données :

Une fois que le compteur intelligent a mesuré et enregistré les données de consommation d'énergie, le module de communication est chargé de transmettre les informations de consommation à la compagnie d'électricité en utilisant l'une des méthodes suivantes [12]

3.1 Communication par ligne électrique (PLC) :

L' utilisation de la technologie de la communication par courant porteur sur ligne (CPL) permet aux compteurs intelligents d' assurer la transmission des données sur les lignes électriques existantes, évitant ainsi de recourir à une infrastructure de communication distincte. Cette alternative peut s' avérer peu coûteuse et permettre une communication fiable, mais elle peut être affectée par la présence de bruit électrique et par des distances importantes en aval d' un transformateur sous-station.[12]

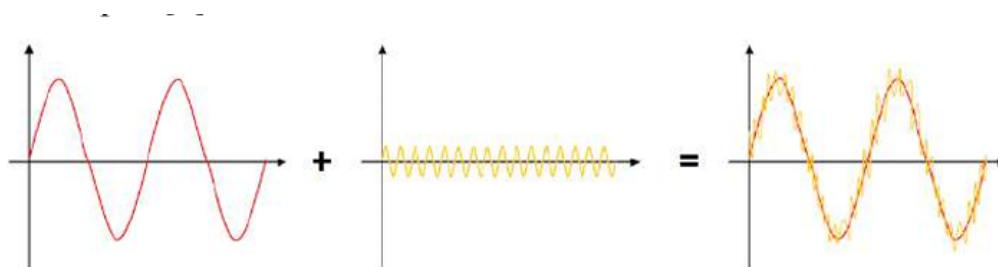


Figure III.7 – illustration du principe général du CPL [7]

3.2 Communication IOT :

Cette communication, qui fonctionne en double sens et dans laquelle transite l'ensemble de l'information, permet non seulement le relèvement à distance de la consommation, mais aussi la réception à distance de commandes, par exemple sur le compteur, pour régler ses paramètres ou, si cela est nécessaire, pour couper l'alimentation. L'automatisation ainsi réalisée limite le besoin d'interventions physiques répétées et améliore la qualité des informations enregistrées.[13]

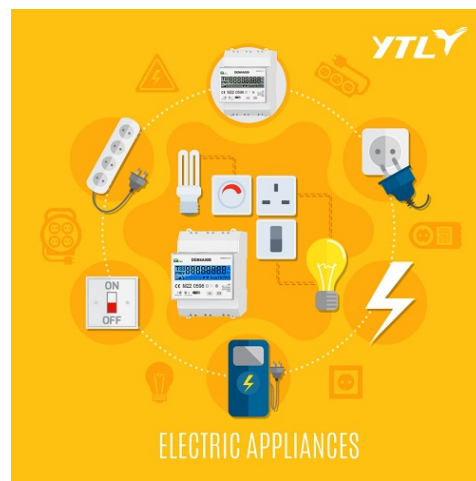


Figure III.8 – illustration du principe général du IOT [8]

4 Principe de communication sans fil :

4.1 Définition de la communication sans fil :

Les communications sans fil sont des technologies permettant la transmission de données sans l'utilisation de câbles physiques. Utilisant des signaux radioélectriques, infrarouges, micro-ondes ou de fréquences, ces systèmes incluent des technologies comme le Wi-Fi, le Bluetooth et les réseaux cellulaires. En pleine expansion avec l'Internet des objets (IoT), les communications sans fil facilitent la connectivité mobile et l'accessibilité dans notre quotidien.

4.2 Différents types de technologies sans fil :

- **Bluetooth** : Couramment utilisé pour relier des dispositifs mobiles, des accessoires audio, des objets connectés. Facile à configurer, faible consommation d' énergie (en particulier du Bluetooth low energy BLE). Portée typique : 10 à 100 mètres.
- **WiFi** : Utilisant des ondes radio (2,4 GHz ou 5 GHz) pour fournir un accès à internet rapide dans la maison, au bureau, dans les espaces publics. Portée typique : 30 à 100 mètres.
- **ZigBee** : Protocole basse consommation pour la domotique, les capteurs, mais souvent utilisé dans les réseaux maillés (mesh networks). Portée typique : 10 à 100

mètres.

Dans ce projet je me suis appuyé sur le protocole de communication Wi-Fi

5 le Wi-Fi :

Le Wi-Fi (parfois incorrectement écrit wifi ou WiFi) n' est en fait pas un acronyme. La Wi-Fi Alliance a inventé le terme en s' appuyant sur la norme IEEE 802.11. Il définit les protocoles qui permettent les communications via des routeurs et des points d' accès sans fil, et est continuellement mis à jour afin de répondre aux demandes accrues du réseau.

5.1 Le réseau local sans fil (WLAN) :

Un réseau local sans fil (WLAN) connecte les nuds du réseau local à l'aide de la technologie radio plutôt que de connexions filaires. Le WiFi est un type spécifique de WLAN conforme à la norme IEEE 802.11 qui s'appuie sur des points d' accès (AP) pour se connecter aux appareils clients et aux devices IoT utilisant les bandes 2,4 GHz, 5 GHz et 6 GHz. D' autres types de réseaux WLAN peuvent fonctionner sur d' autres bandes.

5.2 point d'accès :

Un point d'accès sans fil est un dispositif réseau qui fournit une connectivité de réseau local sans fil (WLAN) aux appareils Wi-Fi tels que les ordinateurs portables, les téléphones portables et les devices IoT en utilisant la technologie radio plutôt que le câblage réseau filaire. Pour répondre au besoin omniprésent de connectivité sans fil, les points d'accès ont été conçus pour fournir le Wi-Fi aux utilisateurs et aux dispositifs IoT dans une large variété

d'environnements et de lieux : en intérieur, à distance, en hôtellerie, en extérieur et dans des environnements dangereux.

Les normes Wi-Fi (802.11) ont connu des avancées significatives pour répondre au développement de la mobilité et de l' IoT, aux demandes de bande passante des applications évolutives et aux besoins métier en matière de technologies sans fil hautes performances, toujours en service et sécurisées.[14]

6 Le compteur d'énergie intelligent WiFi :

Ce compteur d'énergie intelligent WiFi permet de mesurer la quantité d'énergie produite par votre système et la quantité d'énergie qu'il consomme en surveillant tout depuis l'application s'affiche à l'heure l'énergie consommé calibré en réglant le pourcentage. Apportez la surveillance énergétique dans votre maison ou votre entreprise avec notre compteur d'énergie bidirectionnel Smart WiFi. Facile à installer et à contrôler via un siteweb,[15]

6.1 Principe de fonctionnement :

- **Mesure en temps réel :** Les données telles que la tension, le courant, la puissance active (en watts) et l' énergie sont exactement affichées sur un écran LCD intégré du compteur ainsi que sur un site web.
- **Communication WiFi :** La transmission des données est assurée par la connexion WiFi vers une plateforme cloud accessible depuis un smartphone, une tablette ou un ordinateur. Le relevé manuel n'est plus nécessaire et le suivi en temps réel est possible quel que soit son emplacement.

- **Mémoire et reprise après coupure** : En cas d'interruption de l'alimentation, le compteur conserve en mémoire la valeur de consommation et les paramètres renseignés, garantissant ainsi la continuité des données et un bon suivi, fiables, du consommateur.

7 Conclusion

Dans le fonctionnement des compteurs d'énergie intelligents, la communication sans fil joue un rôle déterminant. En permettant la transmission efficace et en temps réel des données de consommation, elle offre la possibilité d'une gestion plus précise et plus autonome de l'énergie, plus adéquate aux besoins des utilisateurs.

Parmi les nombreuses possibilités de communication, le Wi-Fi et le Bluetooth se distinguent par la simplicité de leur intégration, par leur coût, leurs performances qui leur donnent un avantage dans les environnements domestiques et industriels. Leur intégration dans les compteurs connectés offre un gain certain : accès à distance, suivi en direct, historique des consommations, interfaçage avec des applications mobiles.

Il n'empêche que pour réussir cette communication, il faut un paramétrage qui tienne compte des contraintes du réseau, une sécurisation des échanges, un souci de la consommation énergétique du système embarqué, éléments qui doivent être intégrés dès la conception pour garantir un fonctionnement fiable, durable, sécurisé.

La communication sans fil devient ainsi constituante de l'évolution des systèmes de mesure, vers des solutions plus intelligentes, interactives et orientées vers l'efficacité

Chapitre IV

Conception matérielle et
logicielle du projet

1 Présentation du PIC16F877 : Caractéristiques et applications

Le PIC16F877A est un microcontrôleur de la famille PIC (8 bits) par Fabriqué par Microchip Technology il est utilisé dans les systèmes embarqués, l'automatisation industrielle et les projets électroniques éducatifs en raison de sa polyvalence et de sa facilité de programmation

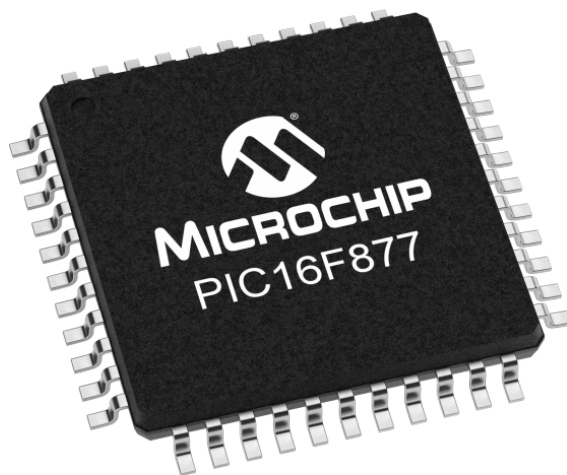


Figure IV.9 – PIC16F877 [9]

1.1 Caractéristiques de base du PIC

- Il possède **40 broches**.
- Il dispose de **5 ports** au total : **PortA**, **PortB**, **PortC**, **PortD** et **PortE**.
- Il prend en charge la **communication série** via deux broches : **TX** (transmission) et **RX** (réception).
- Il prend également en charge le **protocole SPI**.
- Il nécessite l'installation d'un **oscillateur à quartz** dont la fréquence varie de **4 MHz** à **40 MHz**.
- Il est nécessaire de concevoir son **circuit de base** avant de l'utiliser.

- Un **programmeur** ou un **graveur** est requis pour téléverser le fichier **.hex**.
- **PICKit3** est un exemple de programmeur utilisé dans les projets. [16]

1.2 Ports du PIC16F877

- **PortA** : Composé de 8 broches, c'est un port **analogique**. Toutes les broches sont analogiques.
- **PortB** : Composé de 8 broches, c'est un port **numérique**. Toutes les broches sont numériques.
- **PortC** : Composé de 8 broches, c'est également un port **numérique**. Les broches de ce port sont aussi utilisées pour la **communication série**.
- **PortD** : Composé de 8 broches, toutes **numériques**.
- **PortE** : Composé de 3 broches.

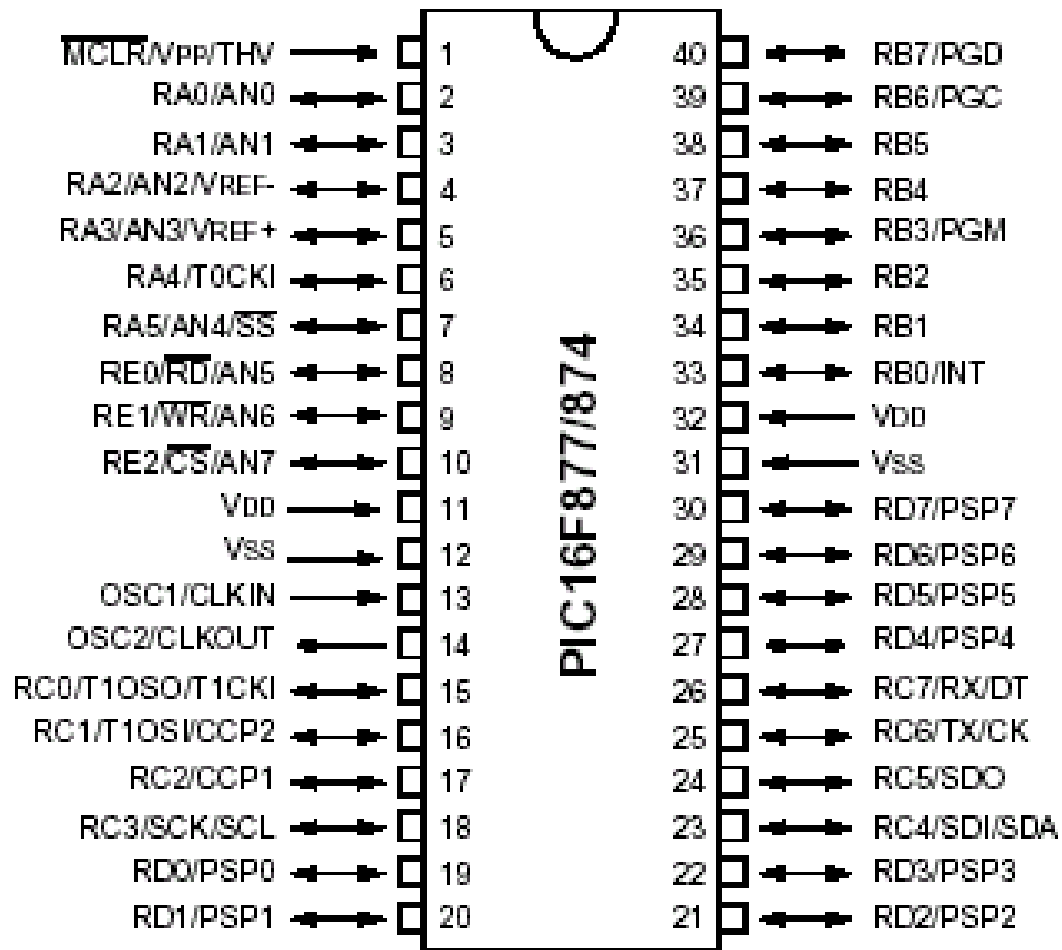


Figure IV.10 – PIC16F877 ports [10]

1.3 Applications du PIC16F877A

- Utilisé dans les **projets de systèmes embarqués**.
- Utilisé en **robotique**.
- Utilisé dans les **projets d'automatisation**[17] .

2 Convertisseur analogique-numérique (ADC)

Un convertisseur analogique-numérique (CAN), est connu sous le nom d'ADC (Analog-to-Digital Converter) c'est un dispositif intégré qui permet de convertir un signal analogique vers une valeur numérique codé sur 10 bits

Le PIC16F877A contient 8 canaux analogiques (AN0 à AN7) utilisé pour la conversion. La résolution de 10 bits signifie que la sortie numérique peut varier de 0 à 1023, représentant une plage de tension généralement comprise entre 0V et la tension de référence (souvent 5V)

L' ADC module du PIC 16F877A contient 4 registres :

- **ADRESH** –A/D Result High Register
- **ADRESL** –A/D Result Low Register
- **ADCON0** –A/D Control Register 0
- **ADCON1** –A/D Control Register 1

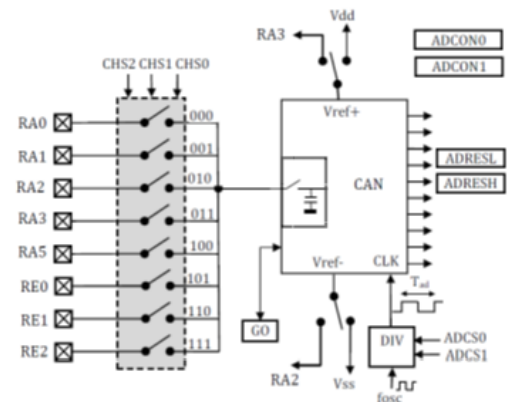


Figure IV.11 – convertisseur analogique numérique [11]

2.1 Configuration du module ADC

La gestion du module s'effectue via les deux registres ADCON0 et ADCON1. Le registre ADCON0 gère les opérations de la fonction de conversion analogique-numérique. Il offre la possibilité de

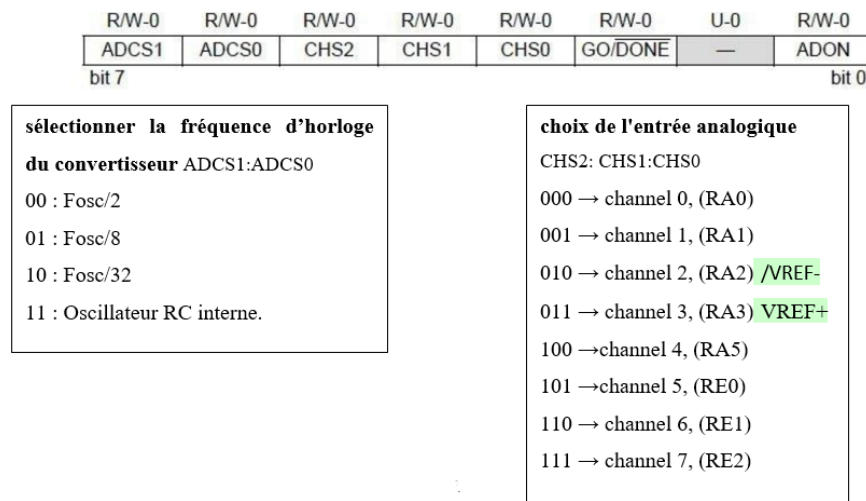


Figure IV.12 – Configuration des registres ADCON0/ADCON1 [11]

- **Go_nDone** représente l'état du bit de conversion A/D.
- **1** = Lance la conversion analogique/numérique. Ce bit est réinitialisé à 0 de manière matérielle.
- **0** = La conversion analogique/numérique est terminée.
- Ce bit active le module **AN**.
- **1** = Convertisseur analogique/numérique en fonctionnement.
- **0** = Convertisseur analogique/numérique hors service.

2.2 Le registre de contrôle ADCON1 :

R/W-0	R/W-0	U-0	U-0	R/W-0	R/W-0	R/W-0	R/W-0
ADFM	ADCS2	—	—	PCFG3	PCFG2	PCFG1	PCFG0
bit 7							bit 0

Figure IV.13 – ADCON1 [11]

2.3 Étapes pour Lire une Valeur Analogique

1. **Initialiser le module ADC** en configurant les registres ADCON0 et ADCON1.
2. **Sélectionner le canal analogique** à lire (par exemple, AN0).
3. **Démarrer la conversion** en activant le bit GO/DONE.
4. **Attendre la fin de la conversion** (le bit GO/DONE devient 0).
5. **Lire la valeur numérique** résultante dans les registres ADRESH et ADRESL.

En résumé, l'ADC est un convertisseur analogique-numérique à approximation successive, avec 8 canaux d'entrée, qui facilite la lecture des signaux analogiques en valeurs numériques [18]

3 Configuration du module TMR1

Le **TMR1** est l'un des minuteries/compteurs (*Timers*) intégrés au microcontrôleur **PIC16F877**. Il s'agit d' un module **16 bits**, largement utilisé pour :

- mesurer des intervalles de temps,
- générer des temporisations,
- compter des événements externes.

3.1 Caractéristiques principales du TMR1

- **Longueur** : 16 bits (registre TMR1H:TMR1L).
- **Source d'horloge** :
 - Horloge interne ($F_{osc}/4$).
 - Horloge externe via la broche T1CKI.
- **Mode compteur** : Peut fonctionner comme minuterie ou comme compteur d' impulsions externes.
- **Prescaler** : Diviseur d' horloge configurable avec des ratios de 1 :1, 1 :2, 1 :4 ou 1 :8.
- **Interruption** : Génère une interruption lorsqu' un débordement (*overflow*) se produit.
- **Oscillateur secondaire** : Possibilité d' utiliser un oscillateur externe (32.768 kHz) pour des applications basse consommation comme une horloge temps réel.

3.2 Configuration du TMR1

La configuration du TMR1 se fait en ajustant les registres suivants :

- **T1CON** : Registre de contrôle du TMR1.
- **TMR10N** (Bit 0) : Active/Désactive le module TMR1.
- **T1CKPS1:T1CKPS0** (Bits 5 et 4) : Configuration du prescaler.
- **T10SCEN** (Bit 3) : Active l'oscillateur secondaire.
- **T1SYNC** (Bit 2) : Synchronisation de l'horloge externe.
- **TMR1CS** (Bit 1) : Sélectionne la source d'horloge (interne/externe).
- **TMR1H** et **TMR1L** : Registres de stockage de la valeur actuelle du compteur.

4 Présentation du ESP32 : Caractéristiques et applications

ESP32 est une série de microcontrôleurs de type système sur une puce (SoC) d'Espressif Systems, basé sur l'architecture Xtensa LX6 de Tensilica (en), intégrant la gestion du Wi-Fi et du Bluetooth (jusqu'à



Figure IV.14 – Module ESP32 [12]

LE 5.0 et 5.1[1]) en mode double, et un DSP. C'est une évolution d'ESP8266. Le principal outil de développement est ESP-IDF, logiciel libre développé par Espressif, écrit en C et utilisant le système temps réel FreeRTOS. Il intègre un nombre important de bibliothèques et on retrouve dans son écosystème des bibliothèques tierce libres pour différents types de périphériques liés à l'embarqué et au temps réel.

4.1 Caractéristiques principales de l'ESP32 :

- **Processeur** : Microprocesseur 32 bits *Xtensa LX6* de Tensilica, en configurations double cur ou monoprocesseur cadencé à 240 MHz, présentant un potentiel de 600

DMIPS (millions d' instructions par seconde).

- **Mémoire** : Environ 520 Ko de SRAM et 448 Ko de ROM embarqués, avec possibilité de mémoire flash externe jusqu' à 16 Mo.
- **Connectivité sans fil** : Wi-Fi (802.11 b/g/n) et Bluetooth (classique et *Bluetooth Low Energy –BLE*) intégrés.
- **Interfaces et périphériques** : Multiples ports d' entrée/sortie (GPIO), capteurs tactiles capacitifs, convertisseurs analogique/numérique (ADC), convertisseurs numérique/analogique (DAC), interfaces SPI, I2C, UART, PWM, etc., permettent la connexion de capteurs, d' actionneurs, de périphériques...
- **Sécurité** : Supporte les standards de sécurité Wi-Fi (WPA, WPA2, WPA3 selon version), le *secure boot*, le chiffrement de la mémoire flash, et propose une fonctionnalité d' accélération matérielle de fonctions cryptographiques (AES, SHA-2, RSA, ECC).
- **Modes basse consommation** : Plusieurs modes de sommeil facilitent les économies d' énergie, adaptés au monde embarqué et aux appareils portatifs alimentés par batteries.[19]

4.2 Convertisseur analogique numérique dans ESP32 :

Caractéristiques principales de l'ADC de l'ESP32

- L'ESP32 possède **deux ADC** :
 - **ADC1** : canaux de GPIO32 à GPIO39
 - **ADC2** : canaux de GPIO0 à GPIO15

(Remarque : l'ADC2 peut entrer en conflit avec l'utilisation du Wi-Fi)
- **Résolution par défaut** : 12 bits (valeurs de 0 à 4095)

- **Tension de référence (V_{ref})** : généralement comprise entre 1.1V et 3.3V (varie selon les cartes, peut être calibrée)
- **Résolution configurable** : 9, 10, 11 ou 12 bits

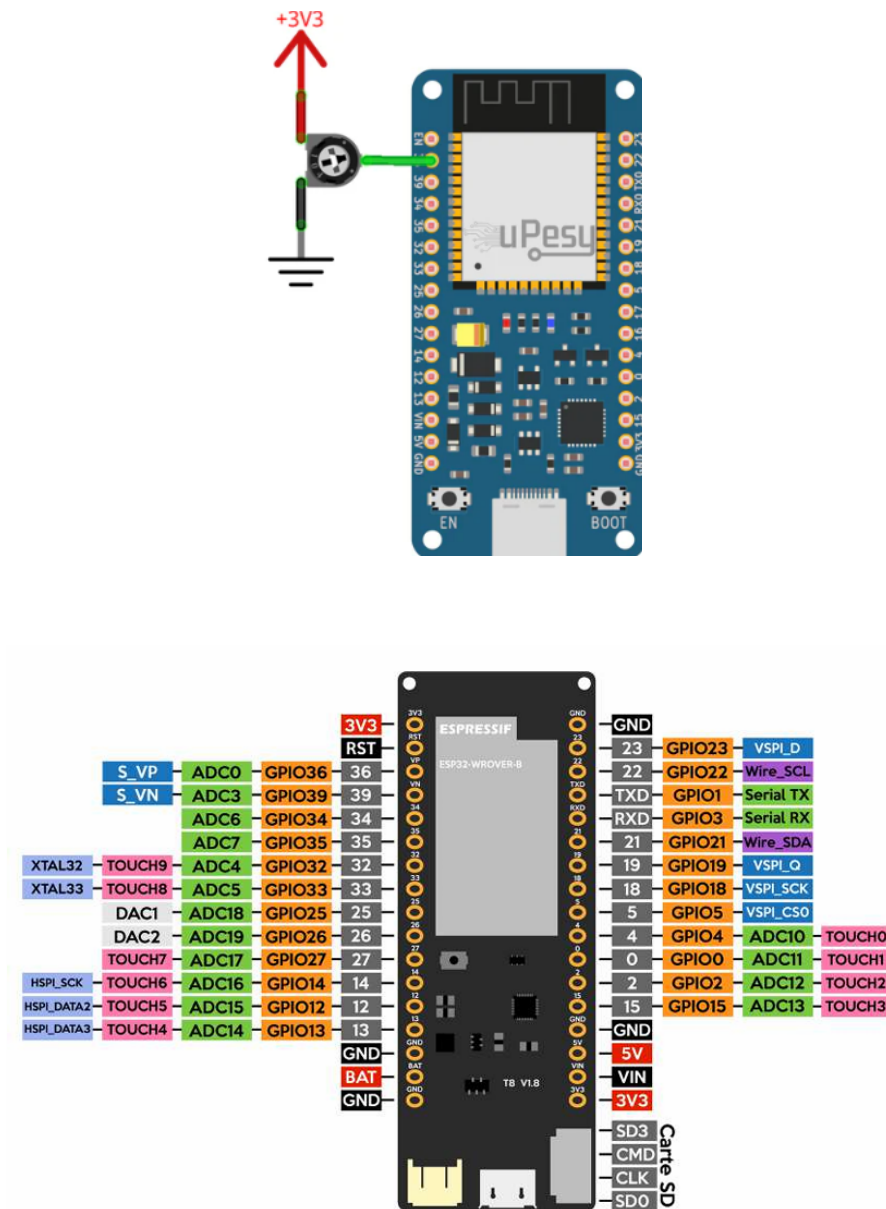


Figure IV.15 – Brochage du ESP32 [13]

5 Les Capteurs utilisées :

Les capteurs LEM sont des instruments de mesure électrique isolés, élaborés pour effectuer des mesures précises et sûres de courants et tensions dans les secteurs industriels et automobiles. Ces derniers offrent une séparation galvanique entre le circuit primaire (haute tension ou courant élevé) et le circuit secondaire (électronique de mesure), assurant ainsi la sécurité et la précision des mesures.

5.1 Définition détaillée des capteurs LEM

Les capteurs LEM évaluent des paramètres électriques (tels que le courant ou la tension) en s'appuyant sur diverses technologies, principalement l'effet Hall, la technologie fluxgate, ou des alternatives sans noyau magnétique telles que les bobines Rogowski. Ces détecteurs délivrent un signal de sortie qui est proportionnel à la grandeur observée, tout en offrant une isolation galvanique totale, une caractéristique cruciale pour prévenir les dangers électriques et les interférences. [20]

5.2 Technologies principales utilisées par LEM :

Les capteurs de courant à effet Hall de la société LEM sont disponibles en trois configurations : **boucle ouverte**, **boucle fermée** et **technologie Eta**.

5.2.1 Capteurs à Boucle Ouverte

- Les capteurs à boucle ouverte sont très économiques.
- Ils sont compacts.



Figure IV.16 – LEM [14]

- Leur consommation d'énergie est très faible.

5.2.2 Capteurs à Boucle Fermée

- Les capteurs à boucle fermée offrent une précision plus élevée.
- Ils permettent une mesure plus rapide et plus dynamique.
- Ils sont adaptés à la mesure de courants sur une large gamme de fréquences.

5.2.3 Transducteurs à Effet Hall avec Technologie Eta

- Les transducteurs Eta ont une construction similaire aux capteurs à boucle fermée.
- Ils possèdent la même géométrie du circuit magnétique, un générateur Hall et un enroulement secondaire.
- Un capteur Eta combine les technologies de boucle ouverte et de transformateur de courant.
- **À basse fréquence** (jusqu' à 2 à 10 kHz selon le modèle), il fonctionne comme un *transducteur à boucle ouverte*.
- **À haute fréquence**, il agit comme un *transformateur de courant*. [21]

Résumé

Les capteurs à effet Hall de LEM permettent de mesurer un courant en détectant le champ magnétique qu' il crée. Selon la technologie (boucle ouverte, boucle fermée, Eta), ils offrent un compromis entre coût, précision, rapidité et plage de fréquences mesurables

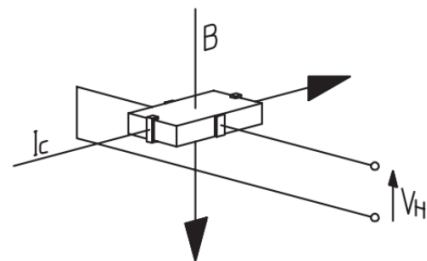


Figure IV.17 – capteur à effet Hall [15]

6 LEM LV 25-P :

Le LEM LV 25-P est un transducteur de tension fonctionnant en boucle fermée, fondé sur l'effet Hall. Il est destiné à la mesure électronique de tensions continues (DC), alternatives (AC) ou impulsionnelles, tout en garantissant une isolation galvanique entre le circuit primaire (haute tension) et le circuit secondaire (faible tension).



6.1 Caractéristiques

- Transducteur de tension à **boucle fermée** (compensé) utilisant l'**effet Hall**.
- Boîtier isolant en plastique conforme à la norme **UL 94-V0**.

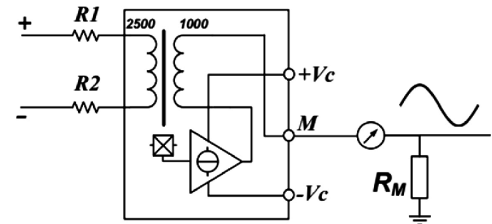


Figure IV.18 –LV 25-P [16]

Caractéristiques Spéciales

- Température ambiante de fonctionnement : **40 °C à +85 °C**.
- Tension d'isolement : **4,2 kV** (4 kV DC pendant 5 minutes).

6.2 Principe de Fonctionnement

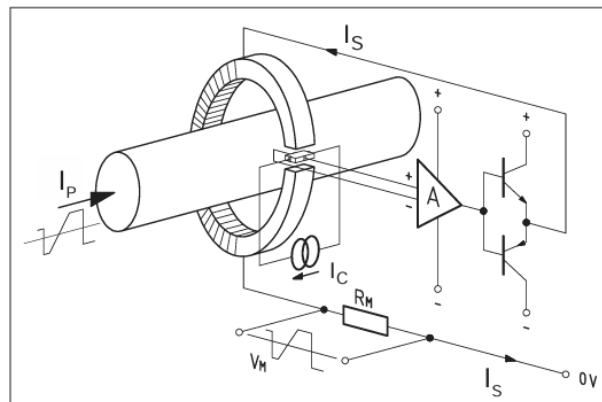
Pour la mesure de la tension, un courant proportionnel à la tension à mesurer doit être injecté à travers une **résistance externe** R_1 , choisie par l'utilisateur et installée en série avec le circuit primaire du transducteur.[22]

7 LEM LA 25-P

La sonde ampermétrique **LEM LA25-P** est un convertisseur de courant à boucle fermée basé sur le principe de l'effet Hall, capable de mesurer des courants **AC, DC et croisés** allant jusqu'à **25 A RMS nominal**.



Figure IV.19 – LA 25-P[17]



Elle bénéficie d'une **séparation galvanique** des circuits primaire et secondaire pour l'isolement des tensions entre le circuit de charge et le circuit de mesure, grâce à son **boîtier en plastique isolant** conforme à la norme **UL 94-V0**.

7.1 Spécificités Techniques

- **Type** : Convertisseur de courant à effet Hall, boucle fermée
- **Plage de mesure** : ± 25 A (courant alternatif), 25 A RMS nominal
- **Sortie** : Courant secondaire proportionnel (25 mA nominal)
- **Taux de transformation** : 1 :1000
- **Alimentation** : ± 12 à ± 15 V DC
- **Précision** : $\pm 0,90\%$ à 25 $^{\circ}\text{C}$
- **Réponse fréquence** : de DC à environ 200 kHz
- **Temps de réponse** : Environ 1 μs
- **Température de service** : -25 $^{\circ}\text{C}$ à $+85$ $^{\circ}\text{C}$
- **Montage** : Passage simple du conducteur primaire devant le capteur[23]

8 LCD :

LCD fait référence à l’affichage à cristaux liquides. C’est un dispositif d’affichage électronique qui se retrouve dans une multitude d’applications, y compris divers circuits et équipements comme les téléphones mobiles, les calculatrices, les ordinateurs, les téléviseurs, entre autres. On utilise principalement ces écrans pour les diodes électroluminescentes à segments multiples et sept segments. Ce module se distingue par son coût modique, sa facilité de programmation, ses animations intégrées et l’absence de restrictions concernant l’affichage de caractères personnalisés, d’animations spécifiques, etc.



Figure IV.21 – LCD16x2 I2C [18]

8.1 Principes de base d’ un écran LCD

Structure

Cristaux liquides : Le cur de la technologie **LCD** repose sur des cristaux liquides. Ces matériaux possèdent des propriétés intermédiaires entre celles d’ un liquide et d’ un solide.

Couches : Un écran LCD est constitué de plusieurs couches, notamment :

1. Une source de lumière (généralement un rétroéclairage **LED**).
2. Une couche de cristaux liquides placée entre deux plaques de verre.
3. Des filtres polarisants (à l’ entrée et à la sortie de la lumière).
4. Des filtres de couleurs pour afficher des images en couleur.

8.2 Fonctionnement

Orientation des cristaux liquides : Lorsque l'écran est activé, des tensions électriques sont appliquées aux cristaux liquides pour orienter leur alignement. Cette orientation détermine la quantité de lumière qui peut passer à travers.

Rétroéclairage : La lumière blanche produite par la source de rétroéclairage traverse les cristaux liquides, puis les filtres colorés pour produire les couleurs rouges, vertes et bleues (**RGB**) nécessaires à la création de l'image.

Pixels : Chaque pixel de l'écran est constitué de sous-pixels rouge, vert et bleu (**RVB**), dont l'intensité est ajustée pour afficher la couleur souhaitée.[24]

9 Visual Studio Code :

Visual Studio Code, commonly referred to as VS Code,[9] is an integrated development environment developed by Microsoft for Windows, Linux, macOS and web browsers. Features include support for debugging, syntax highlighting, intelligent code completion, snippets, code refactoring, and embedded version control with Git. Users can change the theme, keyboard shortcuts and preferences, as well as install extensions that add functionality[25]

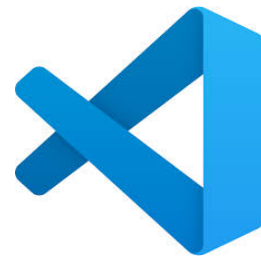


Figure IV.22 – VS Code [19]

C'est ce même environnement de développement que j'utilise pour créer l'interface utilisateur comme Visual Studio Code (VS code, pour faire court), connu pour sa légèreté, sa rapidité et son nombre important d'extensions, efficace pour le développement en HTML et Javascript. J'y structure l'interface avec HTML et je rajoute du comportement dynamique

avec Javascript, tel que la gestion des événements ou la manipulation de contenu affiché. Ce choix me permet d’être très libre dans la conception et le comportement des éléments de l’interface.

10 ThingSpeak :

ThingSpeak est une plateforme d’analyse IoT qui vous permet d’agréger, de visualiser et d’analyser des flux de données en temps réel dans le cloud. ThingSpeak fournit des visualisations instantanées des données transmises par vos appareils. Grâce à



Figure IV.23 – ThingSpeak [20]

l’exécution de code MATLAB[®] dans ThingSpeak, vous pouvez analyser et traiter les données en ligne au fur et à mesure de leur réception. ThingSpeak est souvent utilisé pour le prototypage et la validation de principe de systèmes IoT nécessitant des analyses.

11 MPLAB IDE :

L’environnement de développement intégré (IDE) MPLAB X est un logiciel évolutif et hautement configurable qui intègre des outils puissants pour vous aider à découvrir, configurer, développer, déboguer et qualifier des conceptions embarquées pour la plupart de nos microcontrôleurs et contrôleurs de signaux numériques. MPLAB X IDE fonctionne parfaitement



Figure IV.25 – MPLAB IDE [21]

avec l’écosystème de développement MPLAB, composé de logiciels et d’outils, dont beaucoup

sont entièrement gratuits.

11.1 Caractéristiques de MPLAB X

- **Application autonome** : MPLAB X fonctionne sans connexion Internet. L' environnement est entièrement opérationnel en local.
- **Stockage local** : Les fichiers de projet sont enregistrés sur l' ordinateur de l' utilisateur. Une intégration avec le cloud (GitHub et autres systèmes de gestion de versions) est également disponible.
- **Gestion multi-projets** : L'IDE peut gérer simultanément plusieurs projets avec des architectures matérielles et des compilateurs différents.
- **Personnalisation** : De nombreuses options et paramètres sont disponibles pour adapter l' environnement à vos préférences de développement.
- **Compatibilité avec les outils Microchip** : MPLAB X prend en charge tous les simulateurs, programmeurs et outils de débogage matériel proposés par Microchip.

MPLAB X est l'IDE polyvalent et entièrement configurable de Microchip. MPLAB X offre une prise en charge complète de tous les outils de programmation matérielle de Microchip, une variété d'outils de codage logiciel et d'options de simulation, ainsi qu'une prise en charge complète du débogage matériel et logiciel. Nombre de ces fonctionnalités sont encore immatures ou indisponibles dans MPLAB Xpress.[26]

12 Arduino IDE :

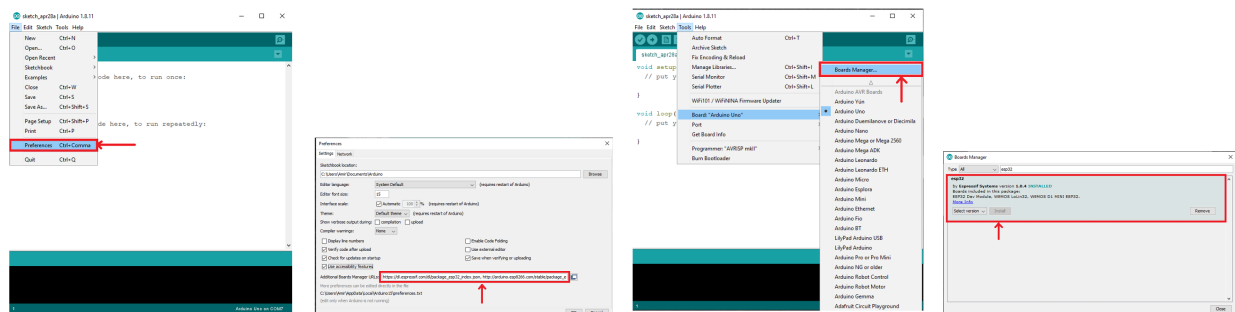
L' environnement de développement Arduino IDE est l' outil utilisé pour écrire des codes avec le langage Arduino C, il est ensuite converti en une forme exécutive qui peut être placée sur le microcontrôleur. Cet environnement de développement est simple et facile à manipuler, et il est presque sans complications dans l' aspect général, il contient seulement ce que



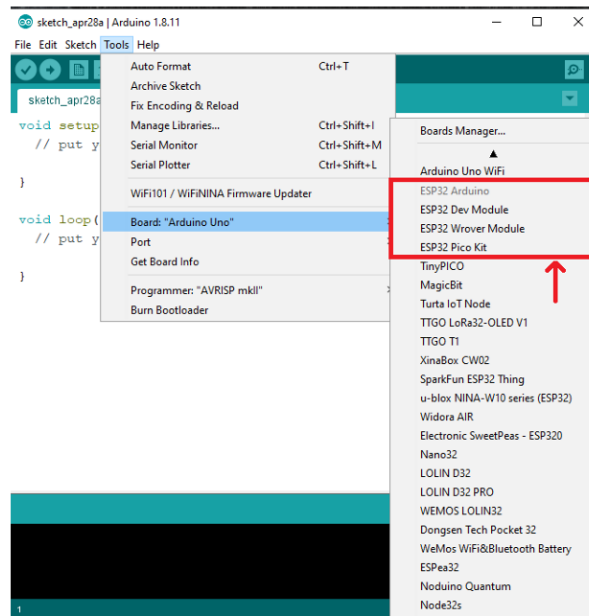
Figure IV.26 – Arduino IDE [22]

le programmeur a besoin pour commencer à développer et en même temps pour charger le code directement au microcontrôleur.[27]

Dans notre projet, on a programmé l'ESP32 avec l'Arduino IDE et pour faire ça il faut suivre les étapes suivantes :



À la fin d'installation on retour à la liste de "Tools" après "Board" et maintenant on peut programmer n'importe quel carte ESP32.



13 Proteus :

La CAO électronique Proteus est une suite logicielle, éditée par la société Labcenter Electronics et revendue en France exclusivement par Multipower. Proteus est actuellement (2020) la seule CAO électronique qui permet la conception d'un système électronique complet et de le simuler, y compris avec le

code des microcontrôleurs. Pour ce faire, elle inclut un éditeur de schéma (ISIS), un outil de placement-routage (ARES), un simulateur analogique-numérique, un environnement de développement intégré pour microcontrôleurs, un module de programmation par algorithmes ainsi qu'un éditeur d'interface pour smartphone afin de piloter à distance des cartes Arduino ou Raspberry Pi.

Proteus est composé de différents packages qui sont : Proteus PCB (Printed Circuit Board) pour le circuit imprimé, Proteus VSM pour la simulation, Proteus Visual Designer/IoT Builder pour Arduino/Raspberry pour développer des projets comparables à ceux conçus avec des outils tels que Scratch et App inventor.[28]



Figure IV.27 – Proteus [23]

Fonctionnalités du logiciel de simulation électronique

- **Réalisations dans la trace électronique** : mise en schémas de circuits électroniques via une bibliothèque riche en composants.
- **Simulation de circuit** : simulation en temps réel des circuits analogiques, numériques et mixtes, avec simulation de microcontrôleurs (PIC, AVR, Arduino, ARM, 8051...) permettant de valider le bon fonctionnement du circuit avant son montage

réel.

- **Conception de circuits imprimés (PCB)** : outils pour le routage automatique ou manuel des pistes, visualisation 3D de la carte de circuit imprimé et génération des fichiers de fabrication.
- **Débogage et analyse** : ajout d' instruments virtuels (oscilloscope, générateur de signaux, etc.) pour analyser les tensions, courants et composants dans la simulation.
- **Interopérabilité MCAD** : fonctions d'import/export pour une intégration fluide dans la chaîne de conception mécanique.

Chapitre V

Réalisation pratique
du compteur intelligent
d'énergie

1 Introduction

L'objectif poursuivi dans le présent chapitre est de construire un compteur d'énergie intelligent en utilisant la technologie de communication. La première section présente le schéma synoptique du compteur intelligent. Dans la deuxième partie, on traite du protocole de communication utilisé. Les réalisations et résultats pratiques du compteur d'énergie communicant sont présentés en fin de chapitre.

Ce schéma synoptique présente un système de mesure d'énergie basé sur l'ESP32, qui collecte les données de tension, de courant et de passage par zéro, les traite, les affiche sur un écran LCD, contrôle un appareil, et enregistre les résultats dans une base de données.

2 Schéma synoptique du compteur intelligent :

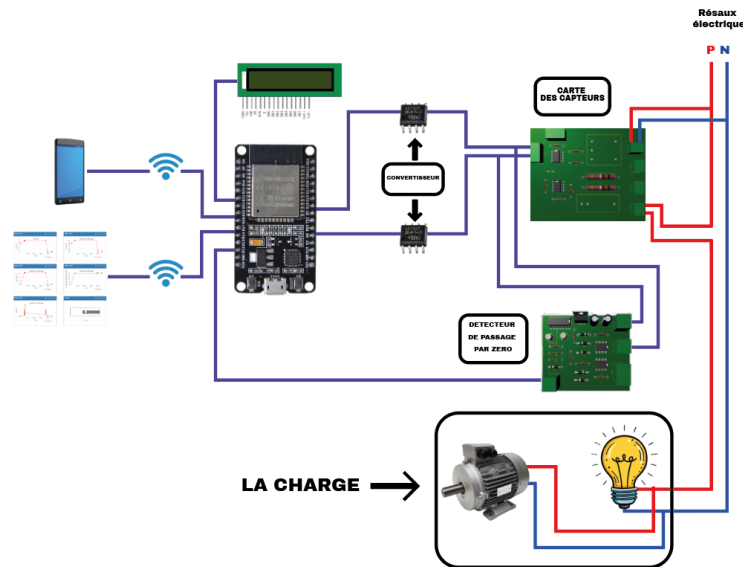


Figure V.28 – Schéma synoptique du compteur intelligent

3 Méthodes de mesure dans un compteur d'énergie intelligent :

3.1 Mesure de tension et de courant :

Pour réaliser la mesure de la tension et de courant dans un compteur électrique intelligent, le système fait appel à des capteurs spécialisés qui vont caractériser en temps réel la tension électrique sur le réseau pour chacune des phases.

3.2 Fonctionnement de la mesure de tension et courant :

3.2.1 Capteur de tension :

Le compteur autonome emploie des capteurs de type Hall, ou des modules de mesure spécialisés **LV-25P**. Pour évaluer la tension aux bornes d'une charge

3.2.2 Capteur de courant :

Un capteur de courant **LA-25P** dans un compteur d'énergie est un dispositif indispensable permettant de mesurer l'intensité du courant électrique présent dans un circuit au sein duquel il est installé dans le but de permettre le calcul de la consommation d'énergie.[28]

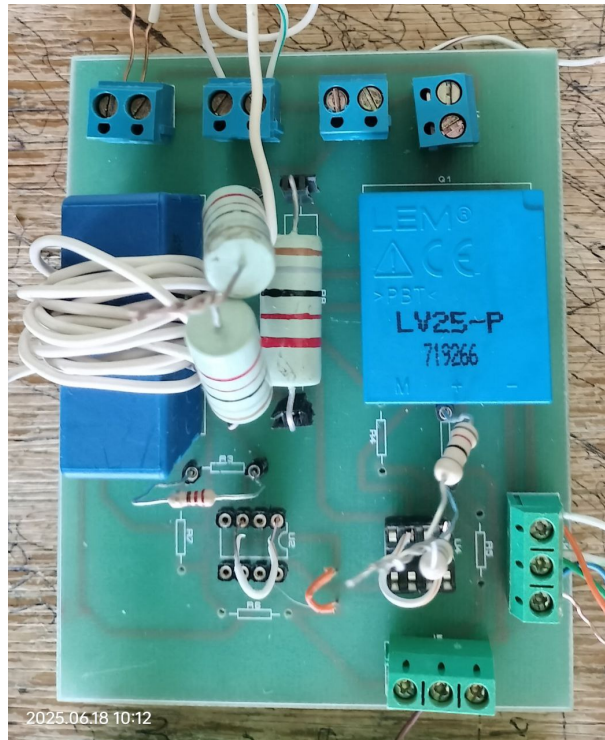


Figure V.29 –Bloque de capteurs

3.3 Convertir en valeur efficace :

Pour convertir la tension de sortie d' un capteur en valeur efficace (valeur RMS, Root Mean Square) il y'a deux méthode :

1. AD736 :

Il s'agit d'un convertisseur monolithique de faible puissance, de précision et efficace vraie/continu. Il est ajusté au laser pour offrir une erreur maximale de $\pm 0,3 \text{ mV}$ $\pm 0,3$ de la mesure avec des entrées sinusoïdales. De plus, il conserve une grande précision tout en mesurant une large gamme de formes d'onde d'entrée, y compris les impulsions à rapport cyclique variable et les ondes sinusoïdales contrôlées par triac (phase).

Son faible coût et sa compacité en font un convertisseur idéal pour améliorer les performances des redresseurs de précision non efficaces dans de nombreuses applications. Comparé à ces circuits, l'AD736 offre une précision supérieure à un coût égal ou inférieur. [29]

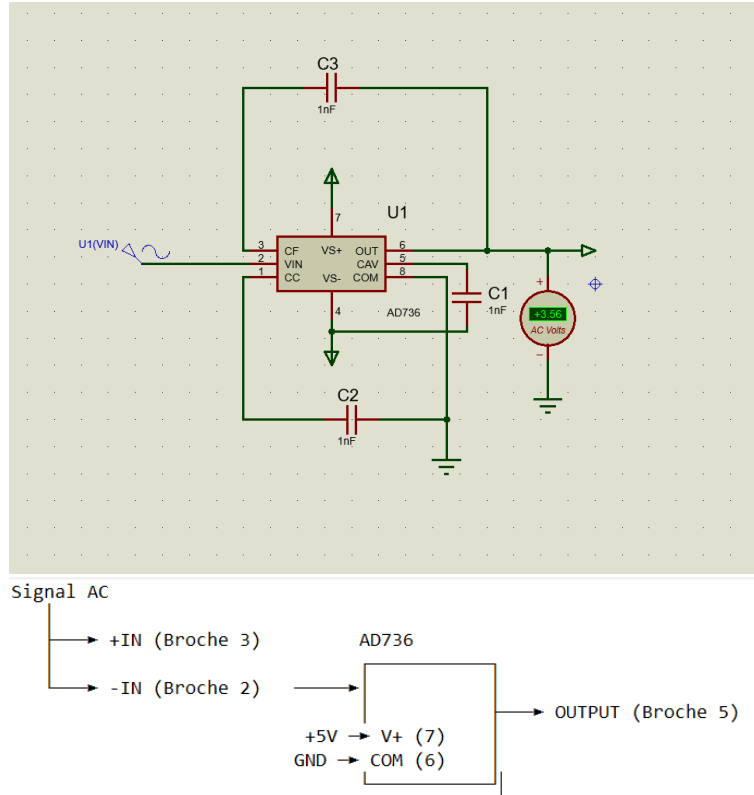


Figure V.20 – Simulation du circuit avec l' AD736 dans Proteus

3.4 Mesure du facteur de puissance :

3.4.1 Le detecteur de passage par zéro :

Le détecteur de passage par zéro (ou zero-crossing detector) peut être utilisé pour mesurer le cos à partir de l'écart de phase entre tension et courant, par exemple dans des

systèmes embarqués low-cost qui estiment simplement le facteur de puissance.[30]

3.4.2 Principe de fonctionnement :

1. Détecter le passage par zéro de la tension.
2. Détecter le passage par zéro du courant.
3. Mesurer le décalage temporel Δt entre les deux.
4. En déduire l'angle φ .
5. Calculer $\cos \varphi$ avec la formule :

$$\varphi = 2\pi f \cdot \Delta t \quad \text{puis} \quad \cos \varphi = \cos(2\pi f \cdot \Delta t)$$

où f est la fréquence du réseau (souvent 50 Hz ou 60 Hz).

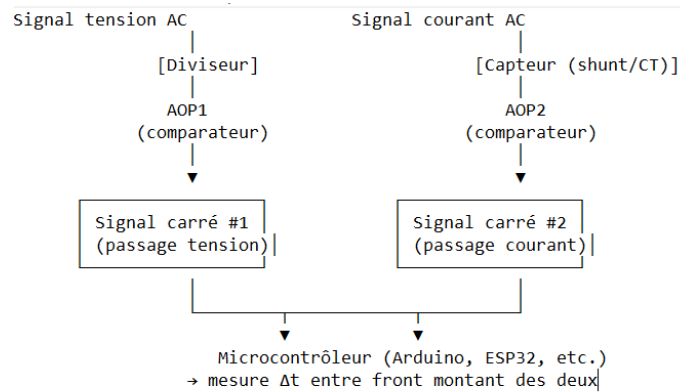


Figure V.32 –Détecteur de passage par zéro

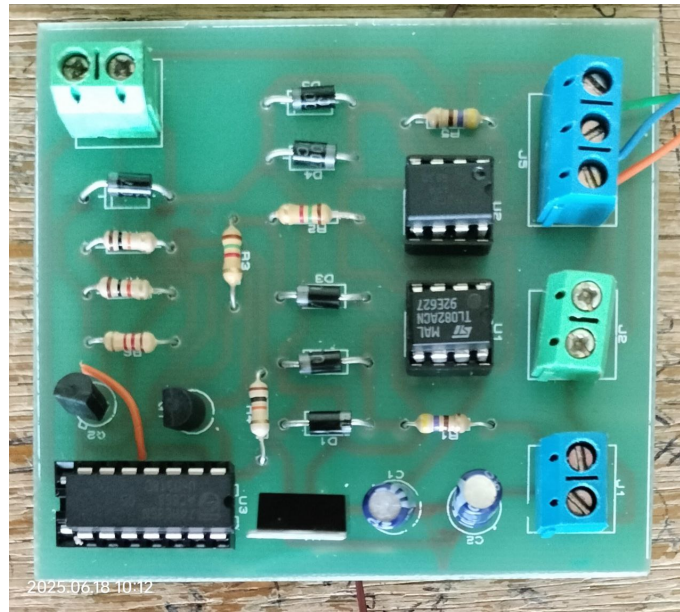


Figure V.33 –Détecteur de passage par zéro (circuit imprimée

3.5 calcule l'énergie consommée :

Après avoir obtenu toutes les valeurs nécessaires, nous pouvons maintenant calculer la puissance active, qui est :

$$P_a = U_{\text{RMS}} \times I_{\text{RMS}} \times \cos(\varphi) \quad (1)$$

Pour calculer l' énergie consommée :

- E : L'énergie consommée (kWh)
- P_a : La puissance active (W)
- t : Le temps (ms)

L' équation de l' énergie consommée est donnée par :

$$E = \frac{P_a \cdot t}{3.6 \times 10^6} \quad (2)$$

4 Protocole de communication :

Le compteur d'énergie intelligent aide les clients à suivre leur consommation d'énergie, qu'ils aient Internet ou non.

4.1 Communication de ESP32 sans internet :

L'ESP32 peut fonctionner sans connexion Internet en mettant en œuvre des technologies locales. Ses principales méthodes sont les suivantes :

- **Wi-Fi en mode Access Point (AP)**

ESP32 crée son propre réseau Wi-Fi. Un smartphone ou un PC peut connecter pour accéder à une page web ou une interface de contrôle.

Pas besoin de routeur ni d'Internet.

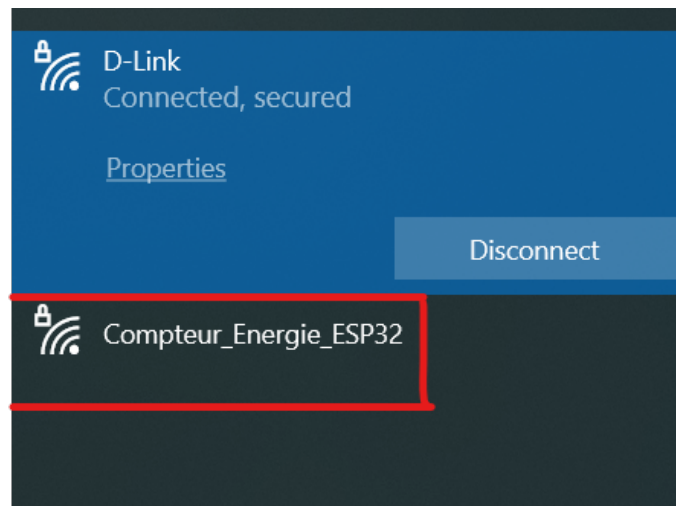


Figure V.34 – Liste des réseaux disponibles

Ensuite, dans la barre de recherche d'un navigateur, nous saisissons l'adresse IP suivante **192.168.4.1**

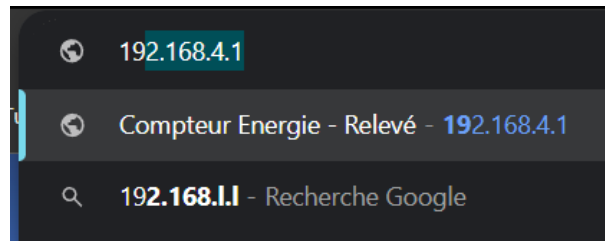


Figure V.35 – l'adresse IP

Après avoir saisi l'adresse, une interface utilisateur s'ouvrira directement, qui affichera toutes les informations au consommateur, où il pourra consulter la consommation d'énergie, et la personne chargée de collecter les informations pourra les envoyer au consommateur via WhatsApp ou SMS.



Figure V.36 –Interface utilisateur

4.2 Communication de ESP32 avec Internet

ESP32 en **Wi-Fimode station** peut se connecter à Internet via une connexion Wi-Fi. Cela lui permet d'envoyer des données vers une base de données en ligne (Firebase, MySQL, ThingSpeak, etc.)

Avec un smartphone, nous pouvons consulter à distance, en temps réel, les données de consommation énergétique.

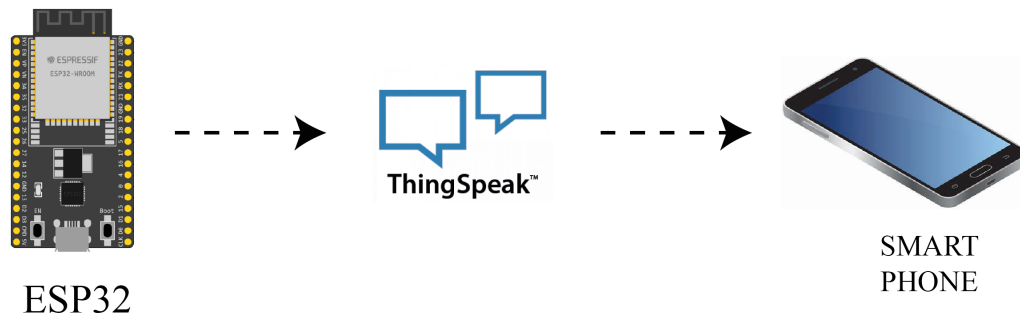


Figure V.37 – Protocole de communication

4.2.1 Création d'un compte sur la plateforme en ligne Thingspeak :

Pour utiliser ThingSpeak avec un ESP32, la première étape consiste à se rendre sur le site thingspeak.com afin de créer un compte gratuit.

Une fois connecté, il est possible de créer un nouveau **channel** en accédant à l'onglet *Channels* puis *My Channels*, et en cliquant sur *New Channel*.

Paramétrage du canal

Lors de la création du channel, il faut remplir les informations suivantes :

- **Name** : Par exemple *Mon Compteur Énergie*.
- **Description** : Par exemple *Relevés de mon compteur ESP32*.
- **Field 1** : Tension (V)
- **Field 2** : Courant (A)
- **Field 3** : Puissance Active (W)
- **Field 4** : Facteur de Puissance ($\cos\phi$)
- **Field 5** : Énergie (kWh)

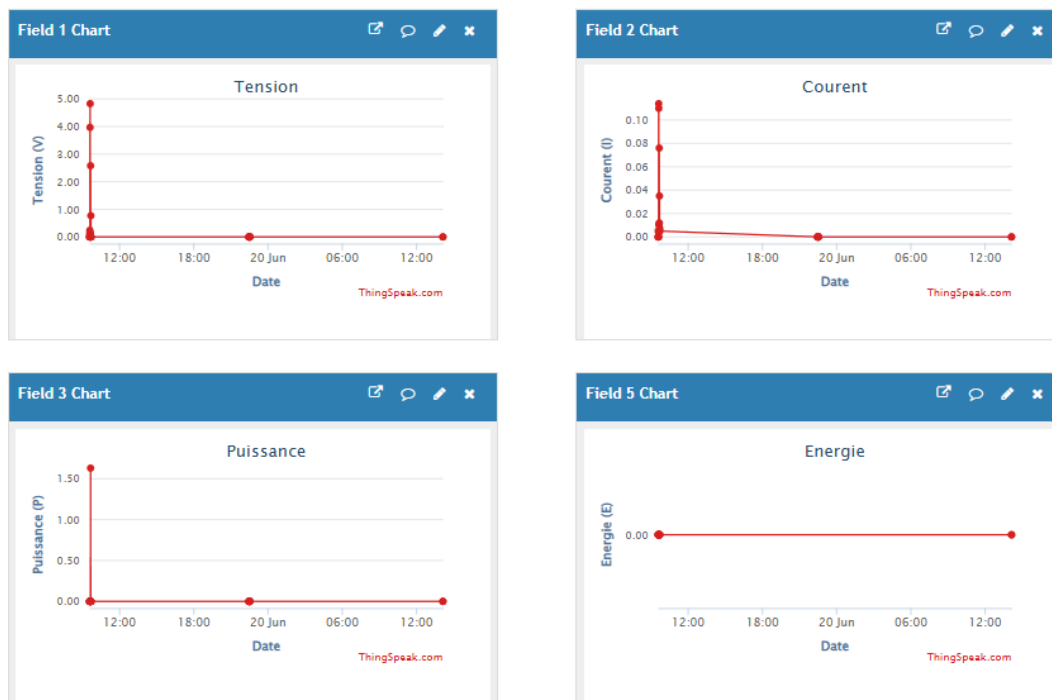


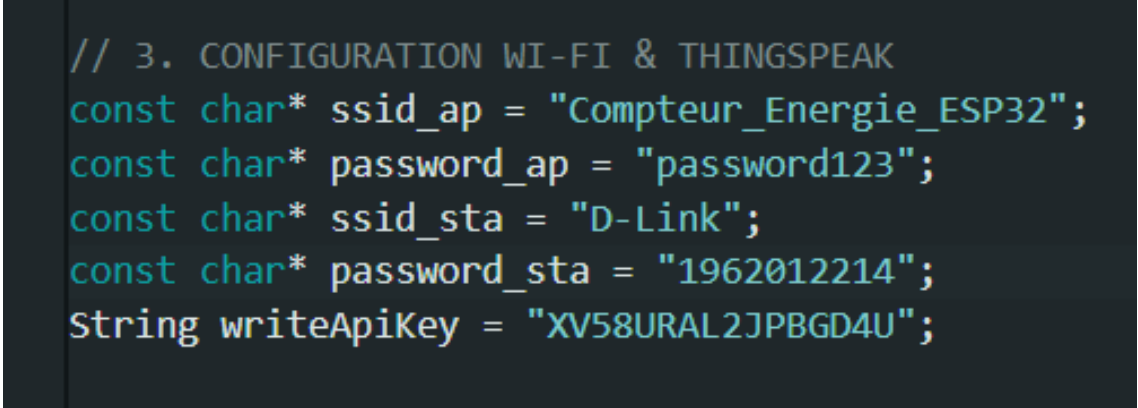
Figure V.38 –Interface utilisateur

ThingSpeak permet d'ajouter jusqu'à huit champs. L'utilisateur peut choisir les mesures qui l'intéressent le plus selon les capteurs disponibles.

Une fois tous les champs configurés, il suffit de cliquer sur **Save Channel** pour enregistrer les paramètres.

Récupération de la clé API

Après la création du canal, l'onglet *API Keys* permet d'accéder à la clé d'écriture, appelée **Write API Key**. Cette clé est un code de 16 caractères, par exemple : A1B2C3D4E5F6G7H8.

A screenshot of a code editor showing C++ code for an ESP32 project. The code is for configuring Wi-Fi and Thingspeak. It includes comments and variable declarations for SSID and password for both access point (ap) and station (sta) modes, and a write API key for Thingspeak.

```
// 3. CONFIGURATION WI-FI & THINGSPEAK
const char* ssid_ap = "Compteur_Energie_ESP32";
const char* password_ap = "password123";
const char* ssid_sta = "D-Link";
const char* password_sta = "1962012214";
String writeApiKey = "XV58URAL2JPBGD4U";
```

Figure V.39 – Configuration du code

Cette clé doit être copiée et utilisée dans le programme de ESP32 pour autoriser l'envoi de données vers ThingSpeak. Elle joue le rôle de mot de passe et ne doit pas être partagée.

5 La réalisation pratique :

5.1 Le schéma global du compteur d'énergie intelligent sous proteus (version du pic16f877) :

L'image ci-dessous représente le circuit électronique complet du système.

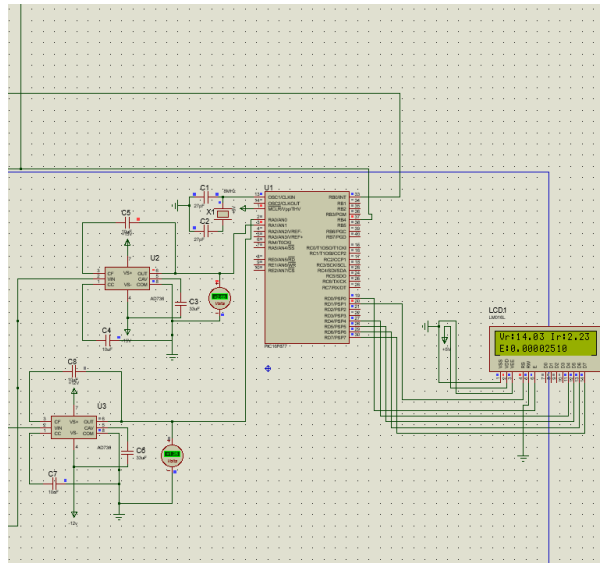


Figure V.40 – Le schéma global (PIC16F877)

Grâce à **Virtual Terminal**, nous pouvons remarquer que le **microcontrôleur** envoie des données via des broches de transmission (TX) et de réception (RX) à **module de Bluetooth**, qui à son tour les partage via Bluetooth.

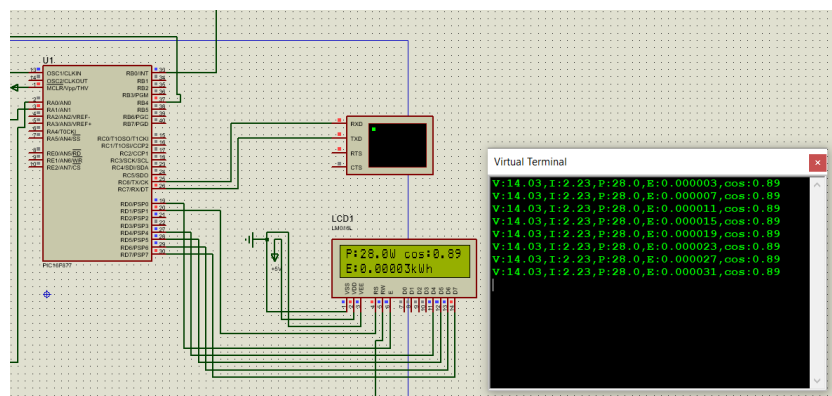


Figure V.41 – Virtual Terminal

5.2 Le schéma global du compteur d'énergie intelligent sous proteus (version ESP32) :

L'image ci-dessous représente le circuit électronique complet du système.

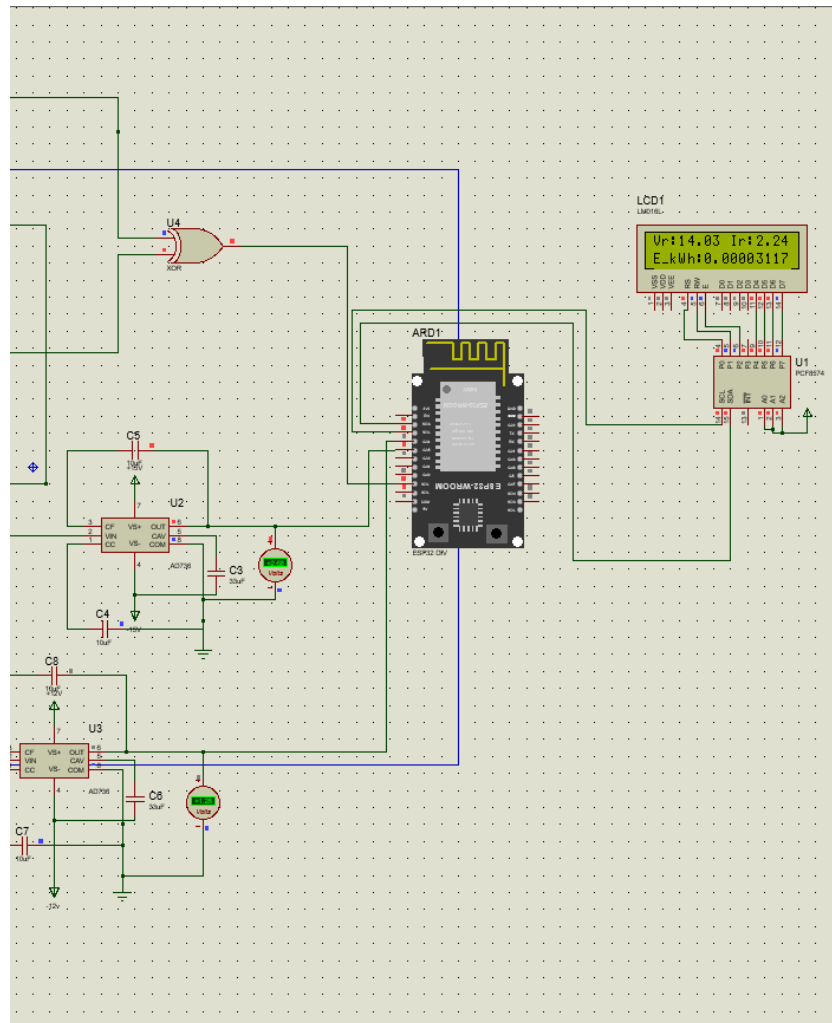


Figure V.42 –Le schéma global

L'énergie représentée sur l'écran est accumulée toutes les deux secondes, ce qui signifie que ESP32 calcule l'énergie consommée par le circuit électrique.

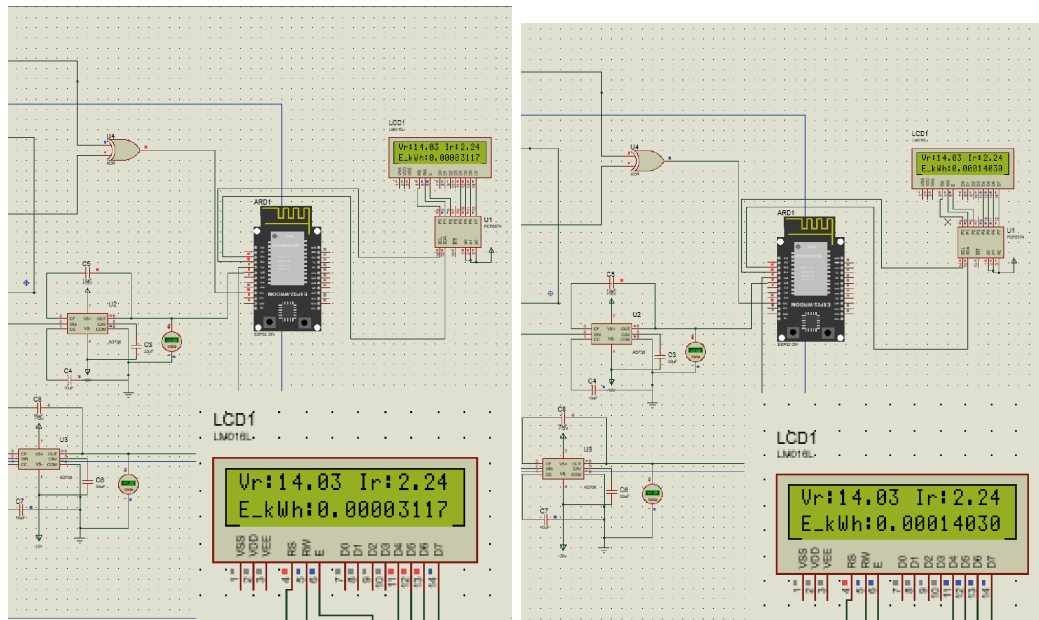


Figure V.43 – Le schéma global

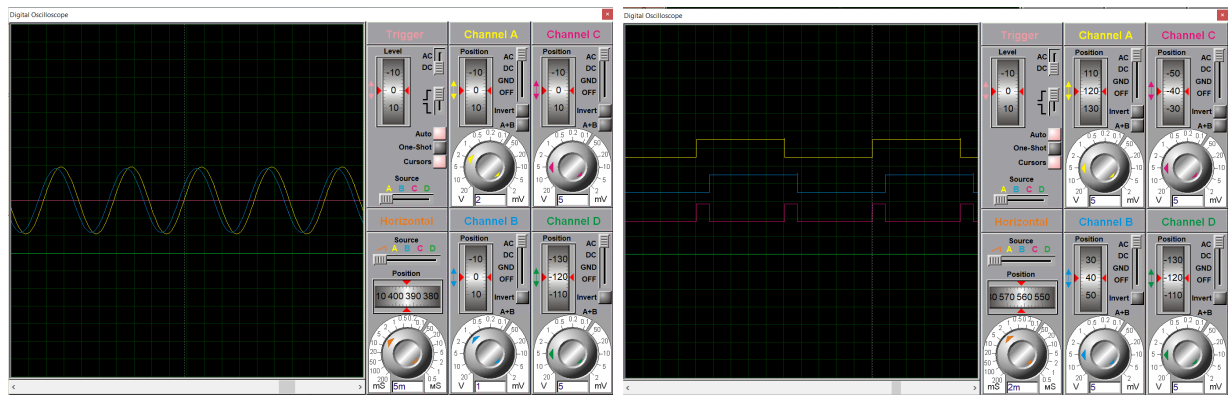


Figure V.44 Visualisation sur Oscilloscope

6 Réalisation pratique :

Les images ci-dessous représentent la réalisation pratique du compteur d'énergie basé sur le **PIC16F877** :

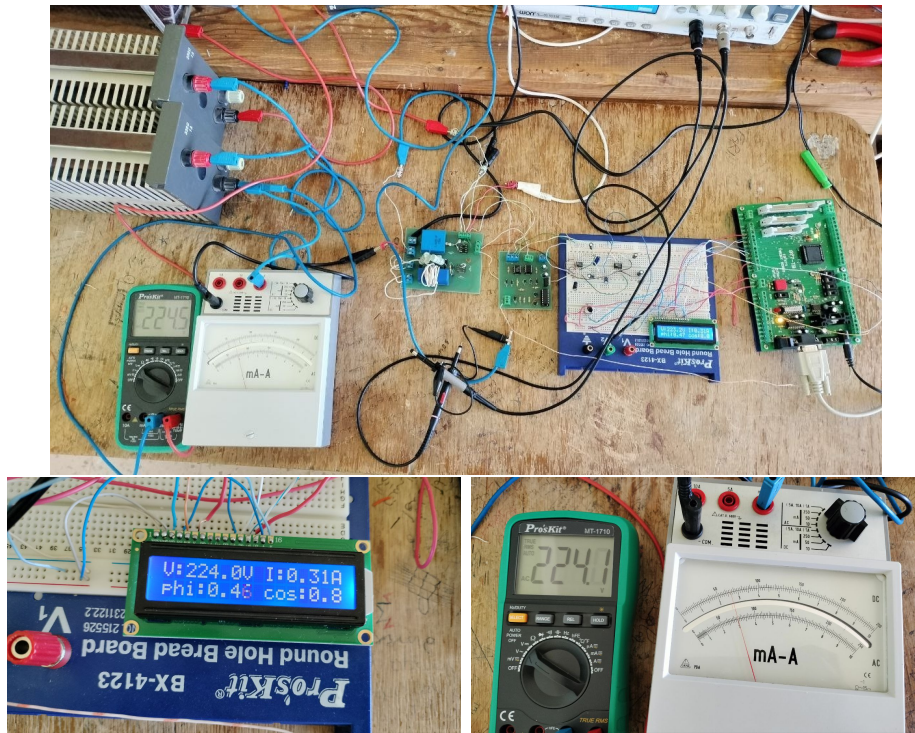


Figure V.45 –Réalisation pratique d'un compteur d'énergie(PIC16F877)

Le PIC16F877 calcule l'énergie consommée par la charge grâce aux circuits qui effectuent les conversions nécessaires.

Les images ci-dessous représentent la réalisation pratique du compteur d'énergie basé sur le **ESP32** :

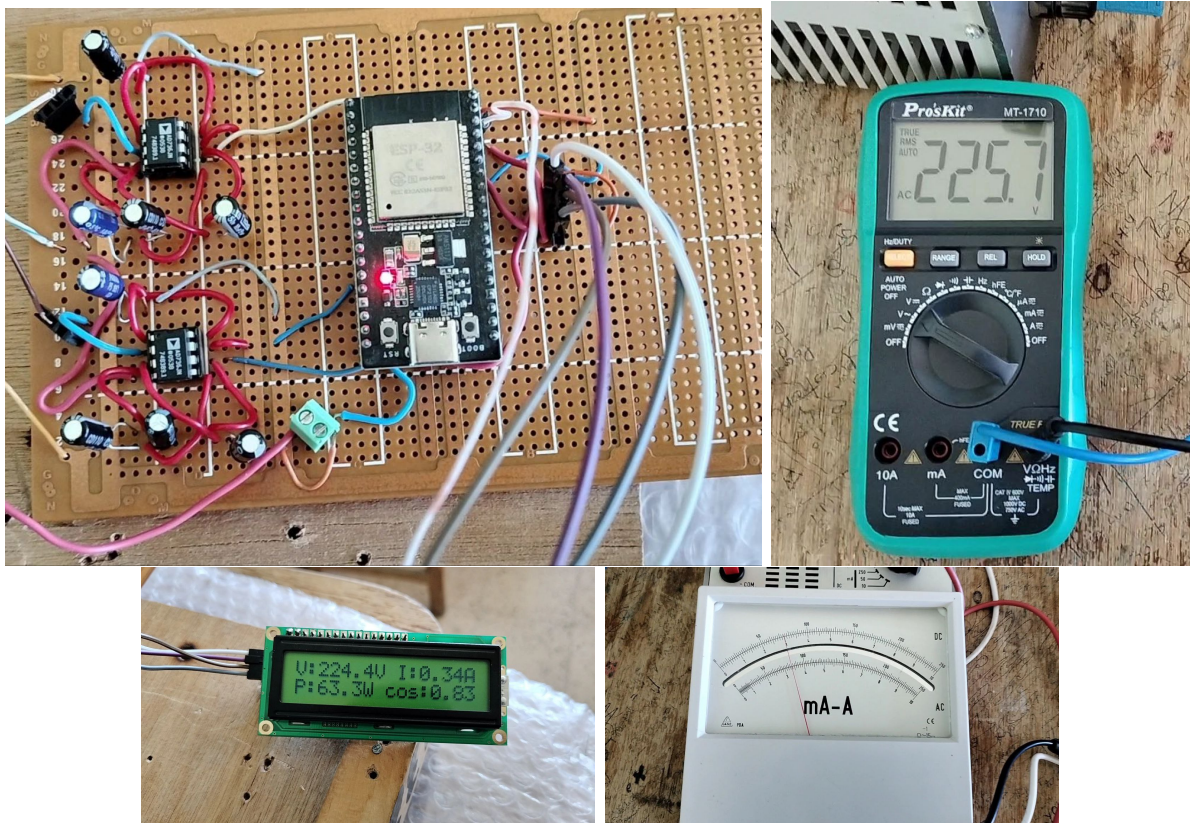


Figure V.46 –Réalisation pratique d'un compteur d'énergie(ESP32)

Conclusion générale :

Réaliser ce travail de projet de fin d'études a permis d'établir un système complet de compteur d'énergie intelligent, matériel et logiciel. L'analyse comparative des compteurs traditionnels, électroniques et intelligents a mis en évidence un progrès technologique vers des systèmes de mesure plus précis, communicants et automatisés.

La conception a reposé notamment sur l'utilisation de microcontrôleurs PIC16F877 et ESP32 associés à des capteurs de tension et de courant LEM permettant ainsi d'assurer la mesure des grandeurs électriques essentielles. L'intégration d'un écran LCD associée à des modules de communication Wi-Fi a augmenté l'interactivité et la possibilité de suivi en temps réel, caractéristiques incontournables d'une gestion énergétique moderne et optimisée.

Les essais qui ont été réalisés sur le logiciel Proteus et les tests effectués en pratique sur prototype ont montré que le système est fonctionnel et remplissant les exigences d'un cadre domestique comme industriel. Ce travail s'inscrit dans une volonté de transition énergétique et numérique et permet d'entrevoir des perspectives intéressantes dans les secteurs de la domotique, de l'efficacité énergétique et des réseaux intelligents (smart grids).

En résumé, cette réalisation illustre le mélange entre compétences techniques mobilisées durant la formation et nécessités contemporaines en matière de gestion intelligent de l'énergie.

En français : Le projet consiste en la réalisation d'un compteur d'énergie intelligent capable de mesurer en temps réel la consommation électrique d'un utilisateur et de transmettre les données vers un smartphone via Wi-Fi ou Internet. Le système repose sur un microcontrôleur qui collecte les valeurs de tension, courant et puissance, puis les envoie vers une application mobile à travers une connexion sans fil. Grâce à une interface conviviale, l'utilisateur peut suivre sa consommation instantanée, consulter l'historique des données et recevoir des alertes en cas de dépassement de seuil. Ce projet vise à améliorer la gestion énergétique, favoriser les économies d'énergie et offrir une solution moderne et accessible pour la surveillance à distance de la consommation électrique.

En anglais : The project involves the development of a smart energy meter capable of measuring a user's real-time electricity consumption and transmitting the data to a smartphone via Wi-Fi or the Internet. The system is based on a microcontroller that collects voltage, current, and power values and sends them wirelessly to a mobile application. Through a user-friendly interface, the user can monitor instant consumption, view historical data, and receive alerts in case of threshold exceedance. This project aims to improve energy management, promote energy savings, and provide a modern and accessible solution for remote monitoring of electrical consumption.

En arabe : يهدف هذا المشروع إلى تصميم وتنفيذ عداد طاقة ذكي قادر على قياس استهلاك الكهرباء في الوقت الحقيقي وإرسال البيانات إلى الهاتف الذكي عبر الواي فاي أو الإنترنت. يعتمد النظام على متحكم دقيق يقوم بجمع قيم الجهد، التيار، والطاقة، ثم يرسلها لاسلكياً إلى تطبيق على الهاتف. من خلال واجهة سهلة الاستخدام، يمكن للمستخدم مراقبة الاستهلاك الفوري، عرض البيانات التاريخية، وتلقي تنبيهات عند تجاوز الحد المسموح به. يهدف هذا المشروع إلى تحسين إدارة الطاقة، تشجيع التوفير في الاستهلاك، وتوفير حل حديث ومتاح لمراقبة استهلاك الكهرباء عن بُعد.

Références :

[1] Compteur électrique ». *Wikipédia*

https://fr.wikipedia.org/wiki/Compteur_%C3%A9lectrique

[2] Dr. Mohamed ZELLAGUI. (Février 2018). Présentation de Comptage et Compteurs Électrique. Institut de Formation de l'Electricité et du Gaz Centre de Formation Ain M'Lila

[3] « Qu'est-ce qu'un compteur intelligent ? » *Wattsense*,

<https://www.wattsense.com/fr-fr/resources/glossary/compteur-intelligent-definition>

[4] « Principe de fonctionnement? » *Sibelga*,

<https://www.sibelga.be/fr/raccordements-compteurs/compteurs-intelligents/quest-ce-quun-compteur-intelligent>

[5] « Site robotique réalisé par MedAli - Professeur informatique ». *Robotique*,

<https://www.robotique.site/>.

[6] « Compteur d'énergie électrique ». *Fuji Electric*,

<https://www.fujielectric.fr/technologies/compteur-energie-electrique/>.

[7] lardy, Cecile. « Circuit monophasé ou triphasé - Nexans Home

home ». *Nexans Home*, 14 février 2022, <https://home.nexans.fr/circuit-monophasé-ou-triphasé>.

[8] *Monophasé : caractéristiques électriques, tarif et puissance*. 20 janvier 2025,

<https://selectra.info/energie/guides/compteurs/electrique/monophasé>

[9] Electrical Engineering, Mathematics and Computer Science (EEMCS)

Computer Architecture for Embedded Systems (CAES)

[10] Puissance active et puissance réactive ». *Energie Plus Le Site*,

<https://energieplus-lesite.be/theories/reseau-electrique9/puissance-active-et-puissance-reactive/>

[11] *La Vitrine linguistique de l'Office québécois de la langue française*. 12 juin 2025, <https://vitrinelinguistique.oqlf.gouv.qc.ca/>.

<https://fr.fmuser.net/content/?21155.html>.

[12] *Qu'est-ce qu'un compteur intelligent ?* | IBM. 23 décembre 2024, <https://www.ibm.com/fr-fr/topics/smart-meter>.

[13] *Important! Compteur d'énergie IoT- Zhejiang Yongtailong Electronic Co., Ltd.* <https://fr.ytl-e.com/news/quarterly-publication/important-iot-energy-meter.html>.

[14] « Glossaire HPE » https://www.hpe.com/emea_africa/fr/what-is/wi-fi.html

[15] « Compteur WiFi Tuya : surveillance intelligente de l'électricité ». *Expert4House*, <https://www.expert4house.com/fr/maison-intelligente/commutateur-intelligent/compteur-d-energie-bidirectionnel-wifi-intelligent-tuya-avec-pince>.

<https://www.feasycom.com/fr/application-of-bluetooth-module-on-smart-meter/>.

[16] *PIC16F877a Microcontroller | PIC16F877a Ports & Pinout | DesignSpark*. <https://www.rs-online.com/designspark/basics-of-pic16f877a>

[18] *FriendlyWire - Discover the Joy of Understanding Electronics*. <http://www.friendlywire.com/tutorials/adc/>

[19] « ESP32 ». *Wikipédia*, 27 avril 2025. *Wikipedia*, <https://fr.wikipedia.org/w/index.php?title=ESP32&oldid=225171111>.

[20] *LEM technologies & innovations | Voltage and Current sensing*. <https://www.lem.com/en/innovations>.

[21] <https://www.thierry-lequeu.fr/data/CH24101F.pdf>

[22] https://www.lem.com/sites/default/files/products_datasheets/lv_25-p_sp5_v12.pdf

[23] https://www.lem.com/sites/default/files/products_datasheets/la_25-p_v6.pdf

[24] Agarwal, Tarun. « LCD 16x2: Pin Configuration, Features and Its Working ». *ElProCus - Electronic Projects for Engineering Students*, 10 septembre 2019, <https://www.elprocus.com/lcd-16x2-pin-configuration-and-its-working/>.

[25] « Visual Studio Code ». *Wikipedia*, 8 juin 2025. *Wikipedia*, [https://en.wikipedia.org/w/index.php?https://apps.microsoft.com/detail/9pk5dth2qs](https://en.wikipedia.org/w/index.php?https://apps.microsoft.com/detail/9pk5dth2qskr?hl=en-US&gl=US)
[kr?hl=en-US&gl=US](https://en.wikipedia.org/w/index.php?https://apps.microsoft.com/detail/9pk5dth2qskr?hl=en-US&gl=US).

[26] « Getting Started with Microchip's MPLAB X IDE – Tutorials for Creating a New Programming Project. » *Mirobo*, <https://mirobo.tech/mplab-x>.

[27] « Arduino ». *Wikipedia*, 14 juin 2025. *Wikipedia*, <https://en.wikipedia.org/w/index.php?title=Arduino&oldid=1295628115>

[28] « Proteus (électronique) ». *Wikipédia*, 17 juin 2025. *Wikipedia*, <https://fr.wikipedia.org/w/index.php?>

[29] *Mixed-signal and digital signal processing ICs | Analog Devices*. <https://www.analog.com/en/index.html>.

[30] *Qu'est-ce que le circuit de détection de passage à zéro-Electron-FMUSER Fournisseur unique de diffusion FM / TV*.

[31] « Arduino ». *Wikipedia*, 14 juin 2025. *Wikipedia*, <https://en.wikipedia.org/w/index.php?title=Arduino&oldid=1295628115>

[32] « Arduino ». *Wikipedia*, 14 juin 2025. *Wikipedia*, <https://en.wikipedia.org/w/index.php?title=Arduino&oldid=1295628115>

[33] « Arduino ». *Wikipedia*, 14 juin 2025. *Wikipedia*, <https://en.wikipedia.org/w/index.php?title=Arduino&oldid=1295628115>

[34] « Arduino ». *Wikipedia*, 14 juin 2025. *Wikipedia*, <https://en.wikipedia.org/w/index.php?title=Arduino&oldid=1295628115>

[35] « Arduino ». *Wikipedia*, 14 juin 2025. *Wikipedia*, <https://en.wikipedia.org/w/index.php?title=Arduino&oldid=1295628115>

Références d'images :

- [1] *Compteur d'énergie électricité monophasé wattmetere 230V 50Hz 10A pla.* <https://cablematic.com/fr/produits/compteur-denergie-electricite-monophasé-wattmetere-230v-50hz-10a-plastique-noir-DE001/>
- [2] *Les compteurs d'énergie électromécaniques – Estel.* 15 janvier 2024, <https://estelenerg.org/les-compteurs-denergie-electromecanique/>.
- [3] « Compteur intelligent eMylo monophasé 63 A 80-400 V, Algeria | Ubuy ». *Ubuy Algeria*, <https://www.ubuy.dz/fr/product/8QOWDLVE2-emylo-smart-meter-single-phase-63a-80-400v-circuit-breaker-and-leakage-protection-wifi-energy-meter-electricity-energy-monitor-tuya-app-remote?ref=hm-google-redirect>. Consulté le 30 juin 2025.
- [4] « Compteurs d'énergie électroniques ». *CLOU GLOBAL*, <https://clouglobal.com/fr/compteur-electronique/>. Consulté le 30 juin 2025
- [5] - *YouTube*. <https://www.youtube.com/watch?v=64xKd7ZdBhA&t=2s>. Consulté le 30 juin 2025.
- [6] Electrical Engineering, Mathematics and Computer Science (EEMCS) Computer Architecture for Embedded Systems (CAES)
- [7] « Concentrateur Linky ». *Collectif Chartres de Bretagne*, 2 février 2018, <https://collectifchartresdebretagne.wordpress.com/tag/concentrateur-linky/>.
- [8] *Important! Compteur d'énergie IoT- Zhejiang Yongtailong Electronic Co., Ltd.* <https://fr.ytl-e.com/news/quarterly-publication/important-iot-energy-meter.html>. Consulté le 30 juin 2025.
- [9] Microchipdirect.com/product/PIC16F877
- [10] « Datasheet Meta Site for Electronic Components ». *DataSheetMeta*, <https://www.datasheetmeta.com/search.php?q=PIC16F877>. Consulté le 30 juin 2025.
- [11] Cours_2 can pic

- [12] Hübschmann, Ida. « ESP32 for IoT: A Complete Guide ». *Nabto*, 28 août 2020, <https://www.nabto.com/guide-to-iot-esp-32/>.
- [13] « ESP32 WROOM 32 TYPE C 38PIN, KIT WIFI PHÁT TRIỂN ». *Điện Tử Nhật Tùng*, <https://dientunhattung.com/san-pham/esp32-wroom-32-type-c-38pin-kit-wifi-phat-trien/>. Consulté le 1 juillet 2025.
- [14] Logowik. *LEM Logo PNG Vector in SVG, PDF, AI, CDR Format*. 14 février 2023, <https://logowik.com/lem-logo-vector-46850.html>.
- [15] *LEM technologies & innovations | Voltage and Current sensing*. <https://www.lem.com/en/innovations>. Consulté le 1 juillet 2025.
- [16] [LV 25-P LEM USA Inc. | Capteurs, transducteurs | DigiKey](#)
- [17] *Composants Actifs - CAPTEUR DE COURANT LEM - CAPTEUR DE COURANT 50A 1/1000 - L'impulsion*. https://www.limpulsion.fr/art/LA55P/LEM__CAPTEUR_DE_COURANT_50A_1_1000. Consulté le 1 juillet 2025.
- [18] *LCD16x2 (I2C) Interfacing with ESP32 | ESP32*. <https://www.electronicwings.com/esp32/lcd16x2-i2c-interfacing-with-esp32>. Consulté le 1 juillet 2025
- [19] « Visual Studio Code ». *Wikipedia*, 1 juillet 2025. *Wikipedia*, https://en.wikipedia.org/w/index.php?title=Visual_Studio_Code&oldid=1298184065.
- [20] *Blog Search Result*: <https://www.iqhome.org/blog-search?tag=thingspeak>. Consulté le 1 juillet 2025.
- [21] « Course 2: Introduction to the MPLAB® X Integrated Development Environment (IDE) ». *Microchip Technology*, <https://skills.microchip.com/course-2-introduction-to-the-mplab-x-integrated-development-environment-ide>. Consulté le 2 juillet 2025.
- [22] Gilbert, Josh. « Which Arduino IDE Should I Use? » *Programming Electronics Academy*, 13 novembre 2023, <https://www.programmingelectronics.com/arduino-ides/>.

[23] *Proteus Design Suite* ». *Wikipedia*, 12 avril 2025. *Wikipedia*,
[https://en.wikipedia.org/w/index.php?title=Proteus_Design_Suite&oldid=1285169](https://en.wikipedia.org/w/index.php?title=Proteus_Design_Suite&oldid=1285169174)
174.*CloseDeleteEdit*