



Projet Puissance

Présenté par :

RUSSO Tom (tom.russo@etu.univ-amu.fr)

GARDY Titouan (titouan.gardy-lognon@etu.univ-amu.fr)

VANDENELSKEN-ROBERT Eliot (eliot.vandenelsken-robert@etu.univ-amu.fr)

GAUBERT Bruno (bruno.gaubert@etu.univ-amu.fr)

DELOI Léonard (leonard.deloi@etu.univ-amu.fr)

Table des matières

I. Introduction et Contexte	3
1. Présentation de l'Équipe et du Projet.....	3
2. Contexte : Enjeux de la Maîtrise Énergétique dans les Bâtiments Intelligents	3
3. Cahier des charges.....	3
II. Description Détailée de la Solution	4
2. Module de Communication Wi-Fi : Conformité à l'exigence de liaison sans fil.....	5
3. Choix du protocole d'échange MQTT : Compatibilité avec les systèmes de supervision Node RED	5
III. Chaîne d'Acquisition et Traitement du Signal.....	6
1. Acquisition du signal de courant : Principe de Fonctionnement de la Pince Ampèremétrique SCT013-030.....	6
2. Acquisition du Signal de Tension	6
2.1. Utilisation et Rôle du Capteur AC Grove.....	6
3. Détermination des différentes puissances (apparente, active, réactive)	7
3.1. Acquisition de la phase du signal.	7
IV. Résultats, Tests et Validation Métrologique	7
4.1. Détermination des Incertitudes avec la Méthode de Monte-Carlo	7
4.2. Analyse Critique et Limites	8
V. Industrialisation et Aspects Économiques	9
5.1.1 Bilan Financier Détailé (Matériel uniquement)	9
5.1.2. Budget du Boitier.....	10
5.2. Propositions d'Amélioration et Roadmap R&D	11
VI. Conclusion	12
6.1. Synthèse des Résultats et Conformité aux Exigences.....	12
6.2. Perspectives du Projet (Future)	12
VII. Annexe.....	13

I. Introduction et Contexte

1. Présentation de l'Équipe et du Projet

Notre équipe de 5 personnes composé d'étudiant en troisième année du BUT Mesures Physiques s'est attaqué à la conception d'un prototype fonctionnel de capteur IoT capable de mesurer la puissance électrique (active, réactive, apparente) et de transmettre ces données vers une interface homme/machine. La solution s'appuie sur des composants simples notamment un microcontrôleur ESP32, un capteur de tension AC Grove et une pince ampèremétrique SCT013-030, tout en garantissant un coût cible du prototype inférieur à 80 €.

2. Contexte : Enjeux de la Maîtrise Énergétique dans les Bâtiments Intelligents

Dans le contexte actuel de transition énergétique, la maîtrise des consommations électriques est devenue un enjeu majeur. Les gestionnaires de bâtiments recherchent des outils fiables et communicants pour suivre la performance énergétique et détecter rapidement les dérives de consommation. Notre capteur vise à fournir une solution intégrée de mesure, communication, et valorisation de données énergétique. Le dispositif est destiné aux gestionnaires de bâtiments et aux ingénieurs énergie souhaitant optimiser leurs installations.

3. Cahier des charges

Notre projet a débuté par l'analyse des besoins et la rédaction d'un cahier des charges. Pour cela, nous avons décrit une fonction principale : Mesurer en temps réel la puissance électrique et les données environnementales, ainsi que les fonctions de contraintes suivantes :

FC1	Coût ≤ 80 €
FC2	Périodicité des mesures
FC3	Liaison sans fil
FC4	Autonomie de 12h sur batterie ou alim 220V
FC5	Sécurité électrique et robustesse
FC6	Interface Homme/Machine
FC7	Précision ±5%
FC8	Miniaturisation pour un faible encombrement/poids
FC9	Compatibilité logicielle avec Node Red
FC10	Open-source
FC11	Simplicité d'utilisation

II. Description Détailée de la Solution

1. Justification des Choix Technologiques

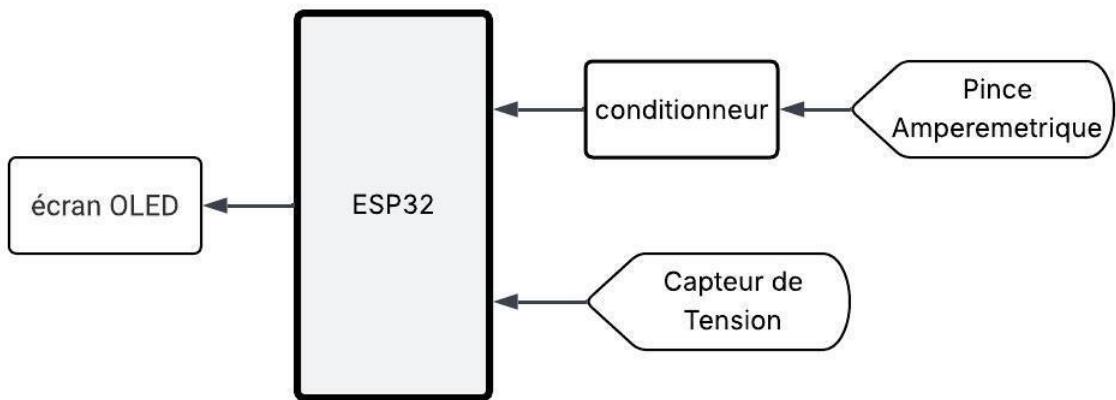


Figure 1 : Schéma simplifié de la chaîne d'acquisition connectée

PRESENTATION DES COMPOSANTS :

ESP32

Agit comme le cerveau du capteur. Il est responsable de l'acquisition des données (Conversion Analogique Numérique ou CAN codé sur 12 bits) en provenance des capteurs de courant et de tension, du calcul des puissances (P, Q, S), et de la gestion de la communication sans fil (Wi-Fi/Bluetooth).

Son intégration du Wi-Fi permet de satisfaire directement l'exigence de liaison sans fil pour la transmission des données. Il est souvent privilégié pour les projets IoT nécessitant une faible consommation et une intégration réseau.

Pince Ampèremétrique - Capteur de courant SCT013-030

Mesurer le courant alternatif I consommé par les charges (résistives, inductives, capacitives) sans contact électrique direct grâce à l'induction magnétique. Il est essentiel pour déterminer la Puissance Apparente S. Elle est capable de mesurer jusqu'à 30 Ampères

L'utilisation d'une pince est un avantage en termes de sécurité car elle isole les parties sous tension.

Capteur de tension AC Grove 101991032

Permet de mesurer la tension alternative (V). Cette information est vitale non seulement pour le calcul des puissances mais aussi pour garantir une fidélité temporelle entre les signaux de tension et de courant, condition essentielle pour toute mesure énergétique complète.

Le format Grove suggère une certaine simplicité d'intégration et d'interfaçage avec le microcontrôleur.

Écran OLED 1.3 IIC

Fournir un tableau de bord local minimaliste affichant les mesures et potentiellement les alertes en temps réel.

L'OLED est connu pour sa faible consommation énergétique et sa clarté, ce qui est cohérent avec l'exigence de faible consommation.

Conditionneur

Ce module sert à optimiser le signal du capteur de courant (SCT013-030) pour le rendre directement exploitable par l'ESP32. Il gère l'amplification et le décalage de la composante continue (DC offset) du signal, assurant ainsi la précision et la cohérence des mesures.

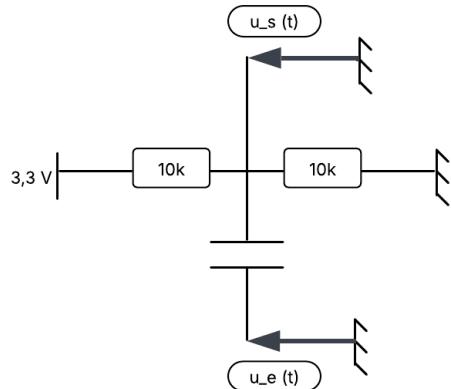


Figure 2 : Schéma simplifié du conditionneur

2. Module de Communication Wi-Fi : Conformité à l'exigence de liaison sans fil

Pour répondre à l'exigence de transmission sans fil des données énergétiques, nous avons choisi d'exploiter la connectivité Wi-Fi native du microcontrôleur ESP32. Ce choix technologique présente plusieurs avantages décisifs pour notre cas d'usage :

Intégration et Coût : Le module Wi-Fi étant intégré directement dans l'ESP32, il ne nécessite aucun composant matériel supplémentaire, ce qui permet de maintenir le coût total du prototype sous la barre des 80 €.

Sécurité et Compatibilité Réseau : Notre firewire a été configuré pour supporter le protocole de sécurité WPA2-Enterprise. Cela permet au capteur de se connecter sur des réseaux d'entreprise ou universitaires sécurisés (comme *Eduroam* utilisé lors de nos tests), une fonctionnalité indispensable pour un déploiement réel dans des bâtiments tertiaires.

Débit et Fiabilité : Contrairement à des protocoles bas débit (LoRa par exemple), le Wi-Fi offre une bande passante suffisante pour transmettre les mesures à haute fréquence si nécessaire, ou pour effectuer des mises à jour du firewire à distance (OTA) ultérieurement.

3. Choix du protocole d'échange MQTT : Compatibilité avec les systèmes de supervision Node RED

Pour l'échange de données entre le capteur et l'interface de supervision, nous avons sélectionné le protocole MQTT (Message Queuing Telemetry Transport). Ce choix est justifié par sa légèreté et sa parfaite adéquation avec l'architecture IoT :

Architecture Publier/S'abonner : Le capteur agit comme un "éditeur" (*publisher*) qui envoie ses mesures sur un sujet défini (capteur/puissance). Cela le découpe totalement de la partie supervision : le capteur n'a pas besoin de savoir qui écoute, il se contente d'envoyer les données, ce qui assure une grande robustesse.

Format des Données (JSON) : Les données (Tension, Courant, Puissances, phase) sont sérialisées au format JSON directement dans le code. Ce format standardisé est nativement interprétable par Node-RED, facilitant le traitement et l'affichage des valeurs sans conversion complexe.

Intégration Node-RED : Node-RED dispose de nœuds "MQTT-in" natifs qui permettent de s'abonner au flux de données du capteur instantanément. On se sert d'un nœud fonction simple qui sépare chaque donnée afin de les envoyer sur des afficheurs séparés pour une bon visualisation par l'utilisateur.

III. Chaîne d'Acquisition et Traitement du Signal

1. Acquisition du signal de courant : Principe de Fonctionnement de la Pince Ampèremétrique SCT013-030

Le fonctionnement repose sur l'induction électromagnétique :

Induction : Lorsqu'un courant alternatif circule dans le câble à mesurer (le primaire), il génère un champ magnétique variable autour de ce câble.

Transformation : La pince SCT013-030, qui entoure le câble, capte ce champ magnétique grâce à son noyau en ferrite. Le conducteur à mesurer agit comme le primaire du transformateur.

Génération de Courant Secondaire : Ce champ magnétique variable induit un courant dans l'enroulement interne de la pince (le secondaire), qui possède un nombre de spires très élevé.

Le rapport entre le courant primaire et le courant secondaire est fixé par le constructeur. Pour le modèle SCT013-030, ce rapport est de 1 : 1000 (30 A / 1V).

2. Acquisition du Signal de Tension

Pour mesurer la tension du réseau électrique, nous utilisons une entrée analogique du microcontrôleur ESP32. Le signal brut étant bien trop élevé pour être traité directement par l'électronique basse tension, il doit être préalablement abaissé et conditionné.

2.1. Utilisation et Rôle du Capteur AC Grove

Le capteur délivre un signal analogique basse tension proportionnel à la tension d'entrée. Ce signal oscille autour d'une composante continue (offset) pour être compatible avec le CAN (Convertisseur Analogique-Numérique) de l'ESP32 qui ne supporte que des tensions positives

On acquiert le signal sur la broche GPIO 35 puis une boucle d'échantillonnage de 100 valeurs (N_VALEURS dans le code) permet d'avoir un échantillon assez important de valeurs. On calcule ensuite la moyenne du signal afin de d'avoir sa valeur affichée sur l'écran.

3. Détermination des différentes puissances (apparente, active, réactive)

Le calcul des puissances repose sur un échantillonnage des signaux de tension $u(t)$ et de courant $i(t)$. Le microcontrôleur effectue une série de mesures (boucle de 100 itérations espacées de 1 ms) pour reconstruire numériquement les signaux sur plusieurs périodes.

Puissance Active P : Elle est calculée en faisant la moyenne des produits instantanés de la tension et du courant (valeurs centrées sans offset) :

$$P_{active} = \frac{1}{N} \sum_{k=0}^{N-1} (v[k] \times i[k])$$

Cette méthode est implémentée dans la variable `somme_vi` divisée par le nombre d'échantillons.

Puissance Apparente S : Elle est obtenue par le produit des valeurs efficaces (RMS) de la tension et du courant, calculées indépendamment via la racine carrée de la moyenne des carrés :

$$S = V_{rms} \times I_{rms}$$

3.1. Acquisition de la phase du signal.

Dans notre solution, le déphasage phi entre la tension et le courant est déduit mathématiquement du facteur de puissance.

Calcul du Facteur de Puissance : Le code calcule d'abord le rapport entre la puissance active et la puissance apparente :

$$\cos(\varphi) = \frac{P_{active}}{S}$$

Extraction de l'angle : L'angle de phase est ensuite obtenu par la fonction arc cosinus (acos) :

$$\varphi = \arccos\left(\frac{P_{active}}{S}\right)$$

Le résultat est converti de radians en degrés.

Une constante de calibration est soustraite au résultat final (`PHASE_ERROR_OFFSET = 9.0`) pour compenser le déphasage matériel induit par les transformateurs des capteurs et le léger délai séquentiel de l'ADC entre la lecture de la tension et du courant.

IV. Résultats, Tests et Validation Métrologique

4.1. Détermination des Incertitudes avec la Méthode de Monte-Carlo

Pour mener à bien une étude métrologique complète, nous avons décidé d'utiliser la méthode de Monte-Carlo. Avec le peu de temps accordé, qui a compris la conception intégrale de notre capteur connecté, de son boîtier, mais aussi de ses caractéristiques métrologiques, nous avons choisis de réaliser une étude reposant sur des notions de probabilités. Celle-ci offrirait à la fois un gain de temps et une conclusion aussi juste qu'une étude classique.

Nous avons alors réalisé une série de dix mesures comprises dans la plage fonctionnelle de notre Wattmètre soit de 0-90V. Nous relevons à chaque fois la valeur de la puissance mesurée par le Wattmètre de référence et celle mesurée par le nôtre. On basera alors notre étude sur ces mesures, que nous allons corriger selon les données métrologiques associées à la référence présentent ci-dessous.

Watts/Volt-Amps (1mV/A) isolated input	Range and Resolution: 0.0W(VA) to 600kW(kVA) average; 0.0W(VA) to ±2000kW(kVA) peak Accuracy: AC+DC: ±(1% + 4 digits) + probe specs
---	---

Figure 3 : Données métrologiques sur la mesure de puissance du Wattmètre de référence

On va alors tracer la courbe de notre puissance mesurée par rapport à celle de référence pour en déduire l'incertitude sur la mesure de notre Wattmètre. Les méthodes utilisées et le tableau associé à cette étude est présente dans le GitHub.

4.2. Analyse Critique et Limites

Démonstration de l'Atteinte de la Précision Cible

Bien que le banc de test ait permis de valider la méthodologie de calcul et la fonctionnalité de la chaîne d'acquisition pour les charges simulées, l'atteinte de la Précision cible de ± 5% n'a pu être vérifiée que partiellement, notamment à cause des limites intrinsèques du prototype liés aux composants choisis.

Le capteur de courant (SCT013-030) et le conditionneur permettent une mesure de courant fiable.

Analyse Critique et Limitation Majeure du Capteur de Tension

La principale limitation du prototype est liée au choix du Capteur de tension AC Grove Ce composant, bien qu'intégré pour sa facilité d'utilisation et son faible coût, n'est pas conçu pour opérer directement sur la gamme de tension secteur (220 V AC).

L'usage du Capteur AC Grove nous a contraint à limiter les essais à des tensions de très faible amplitude. Par conséquent, la démonstration de la précision de 5% n'est validée que pour un facteur d'échelle réduit, ne représentant pas les conditions réelles d'utilisation (220 V du secteur) prévues dans le cadre du bâtiment.

Cette limitation compromet l'estimation fiable de la puissance active et réactive, car l'acquisition du signal de tension réelle dans l'environnement cible (220 V AC) est essentielle pour un calcul précis du déphasage.

V. Industrialisation et Aspects Économiques

5.1.1 Bilan Financier Détailé (Matériel uniquement)

BUDGET

DATE

05/12/2025



QUANTITE	DESCRIPTION	PRIX	TOTAL
1	ESP 32 - microcontrôleur	8.50 €	8.50 €
1	Capteur de tension AC Grove 101991032	4.00 €	4.00 €
1	Pince Ampèremétrique - Capteur de courant 30 A SCT013-030	8.00 €	8.00 €
1	Écran OLED 1.3 IIC	10.00 €	10.00 €
6	Câbles multicolore 10cm	1.00 €	6.00 €
1	Conditionneur - DFRobot Analog AC Current Sensor	5.00 €	5.00 €
TOTAL :		41 .50 €	

5.1.2. Budget du Boitier

Pour le coup du boitier, plusieurs cas de figures ce présente à nous,

Cas n°1 :

Nous sommes des étudiants de l'IUT et l'imprimante 3D est mise à disposition, dans ces cas-là il nous suffit de compter le plastique utilisé en dépense.

Sachant que :

- 1 kg de plastique coutre 23 euros
- Notre boite pèse 0.102 kg

Alors le prix de notre boite est de $23 * 0.102 = 2,35$ euros

Cas n°2 :

Nous sommes auto-entrepreneur et nous souhaitons confier l'impression de nos boites à une entreprise tier.

Sachant que :

- Le cout horaire facturée est de 35 euros/heures
- Notre boite met 15h à être intégralement imprimé

Alors le prix de notre boite est de $35 * 15 = 525$ euros

Cas n°3 :

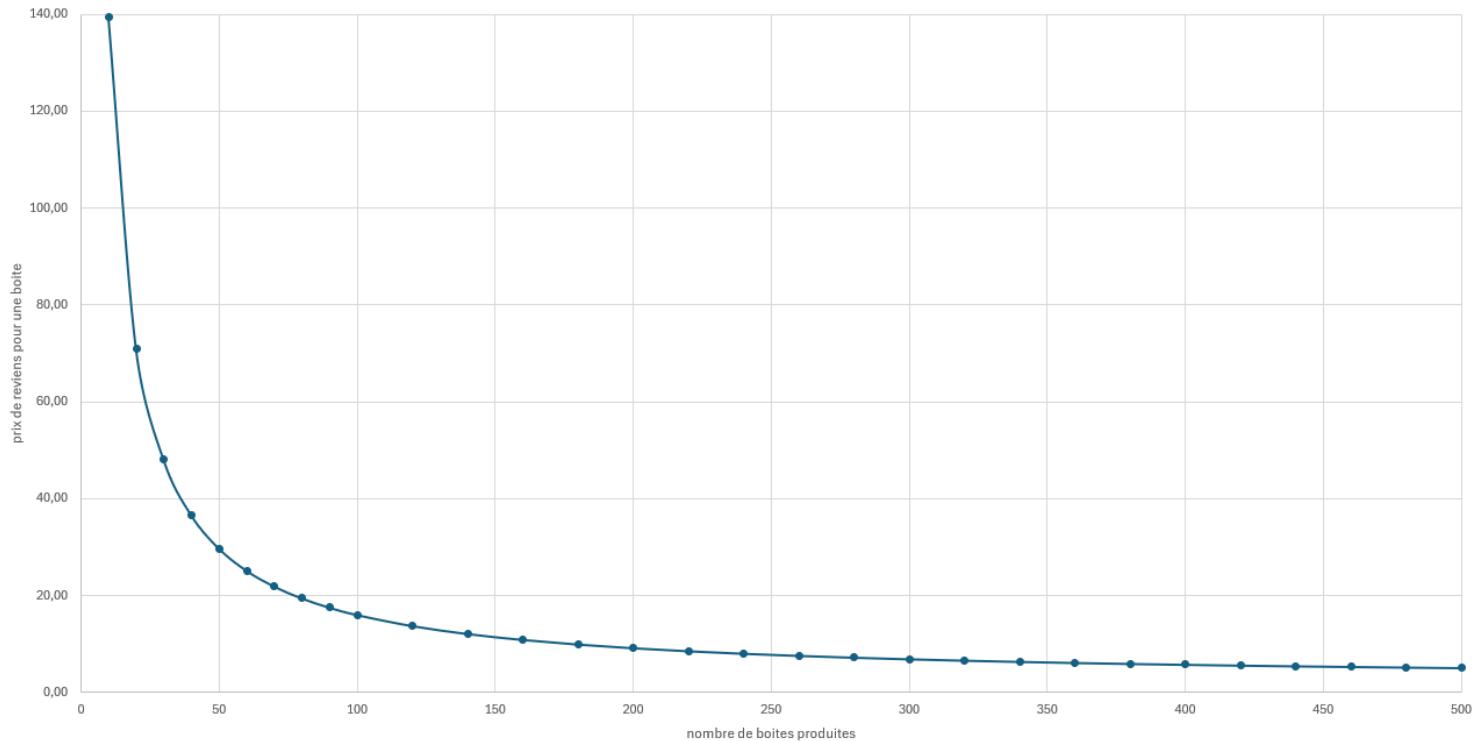
Nous sommes toujours auto-entrepreneur et nous souhaitons investir dans une imprimante 3D pour faire nous même l'impression de nos boites.

Nous avons consulté les prix d'une imprimante en fonction de nos besoins, nous nous sommes arrêtés à l'Imprimante 3D CREALITY K2 Plus Combo (guide d'utilisation et fiche technique complète en annexe). Cette imprimante est au prix de 1311euros TTC et a une résolution de 50 microns, largement suffisant pour notre boite.

Pour calculer le prix d'une boite, nous devons alors prendre en compte le prix de l'imprimante, le cout d'entretien et le coup du plastique.

Evidemment, plus nous produirons de boites et plus les coûts associés seront faibles, c'est pourquoi nous avons fait une courbe d'amortissement afin connaitre à partir de combien d'exemplaires nous rentrons dans le budget total de 80 euros

prix d'une boîte en fonction du nombre d'exemplaire imprimé



(Vous pourrez retrouver le fichier Excel avec les calculs associé à la courbe sur le GitHub)

5.2. Propositions d'Amélioration et Roadmap R&D

Après avoir mené une campagne de mesures à l'aide de notre boîtier, un point nous a frappés : la cadence de rafraîchissement de notre afficheur était relativement longue.

En effet, les mesures mettaient 5 à 10 secondes à s'actualiser. Ce délai, pour réaliser plusieurs dizaines de mesures ou pour régler une machine, est particulièrement contraignant. L'une des pistes d'amélioration prioritaires sera donc de rendre notre interface plus réactive et plus rapide.

En second lieu, nous nous sommes rendu compte que le capteur de tension qui nous avait été confié ne fonctionnait que pour une plage allant de 0 à 150 V. Or, compte tenu d'une utilisation envisagée dans des environnements industriels, nous estimons que la plage de tension minimale acceptable doit être, au minimum, de 0 à 230 V.

Nous devrons donc identifier et intégrer un nouveau capteur de tension qui satisfasse cette condition technique.

Proposition d'Amélioration : Investissement pour l'Industrialisation

Afin de lever cette limitation et de garantir la conformité à l'environnement d'utilisation, il est indispensable de revoir le choix du composant de mesure de tension avec un investissement financier supplémentaire.

Nous recommandons l'intégration d'un Transformateur de Tension Miniaturisé (ZMPT101B ou équivalent).

Ce type de capteur, disponible pour un prix unitaire autour de 5 € à 10 € (légèrement supérieur au capteur Grove), est spécifiquement conçu pour convertir de manière sûre la haute tension du secteur (jusqu'à 250 V AC) en un signal basse tension (5 V AC) exploitable par l'ESP32.

Cet investissement supplémentaire augmente légèrement le cout du prototype, mais il est indispensable pour passer à une phase de test et de validation en conditions réelles, permettant ainsi de fiabiliser la mesure et de préparer la petite série

VI. Conclusion

6.1. Synthèse des Résultats et Conformité aux Exigences

Ce projet a permis de concevoir et de réaliser un prototype fonctionnel de capteur IoT de mesure de puissance (Active, Réactive, Apparente), répondant aux exigences du Cahier des Charges (CDC) d'EcoWatt.

On a pu, mettre en place la chaîne d'acquisition complète, en utilisant le SCT013-030 pour le courant et le capteur AC Grove pour la tension.

Assurer la connectivité en intégrant le Wi-Fi de l'ESP32 et le protocole MQTT, garantissant l'intégration à un système de supervision (Node-RED).

Respecter le coût cible du prototype de matériel, le Bilan Financier Détaillé (Matériel uniquement) ayant été établi.

Le prototype démontre la faisabilité technique d'un outil de surveillance énergétique simple, communicant et à faible coût et répondant aux exigences données.

6.2. Perspectives du Projet (Future)

Malgré la démonstration fonctionnelle, l'analyse critique a révélé une limitation majeure du prototype liée à l'utilisation du Capteur de tension AC Grove, qui n'est pas adapté à la mesure directe sur la tension secteur (220 V AC) prévue dans l'environnement d'utilisation.

Pour passer à l'étape d'industrialisation et de validation en conditions réelles, notre Roadmap R&D prévoit un ajustement nécessaire :

Remplacement du capteur de tension par une référence compatible 220 V AC type ZMPT101B ou équivalent ; pour atteinte de la précision cible $\pm 5\%$ sur toute la gamme de fonctionnement.

Mise en œuvre d'un boîtier pour la miniaturisation, la robustesse, et l'isolation des parties sous tension.

Ces améliorations permettront d'assurer la fiabilité du capteur pour la production d'une petite série et de répondre pleinement aux exigences de performance et de sécurité d'EcoWatt.

VII. Annexe

A. Code Source Documenté (Lien GitHub)

Tous les documents et codes nécessaire à la reproduction du projet sont disponibles sur le [Github](#) du projet.