

Mesure Intelligente de la Consommation Énergétique dans les Réseaux Électriques

Abderrahmen SELLAMI¹, Kamel CHERIF², Halima DZIRI³

Institut Supérieur des Etudes Technologiques de Radès, Direction générale des études technologiques, rue El Kods - Radès ville - Tunis

¹sellamiabd02@gmail.com

²Kam.cherif@yahoo.fr

³Dziri_halima@hotmail.fr

Résumé— Dans un contexte de transition énergétique et d'optimisation de la gestion des réseaux électriques, le déploiement des solutions de mesures intelligentes constitue un levier majeur pour améliorer l'efficacité énergétique. Ce travail présente une conception, réalisation matérielle et des tests d'un compteur intelligent hybride destiné à la mesure précise de la consommation énergétique dans les réseaux électriques. Ce dispositif combine des technologies de mesure avancées, des capacités de communication sans fil et des fonctionnalités de surveillance en temps réel.

Mots-clés— Compteur d'énergie électrique intelligent, modules de mesure PZEM-004T, ESP32, module Wi-Fi, Smart Grid, télérelève, détection de fraude.

I. INTRODUCTION

L'évolution rapide des technologies numériques et la transition énergétique mondiale ont conduit à un besoin croissant des systèmes de mesure intelligents, capables de suivre en temps réel la consommation énergétique, de détecter les anomalies et d'optimiser la gestion de l'électricité [1-3]. Dans ce contexte, les compteurs intelligents (ou Smart Meters) jouent un rôle crucial dans la modernisation des réseaux électriques dit Smart Grid [4-6].

Contrairement aux compteurs électromécaniques traditionnels, les compteurs intelligents offrent des fonctionnalités avancées telles que la télérelève, la détection de fraude, l'analyse de la consommation et la communication bidirectionnelle avec le fournisseur d'électricité [7]. L'une des caractéristiques clés que doit intégrer un compteur moderne est la flexibilité de mesure, notamment la capacité à fonctionner aussi bien en branchement direct (pour les faibles courants) qu'en branchement indirect via des transformateurs de courant (pour les installations à forte puissance).

Cet article, s'inscrit dans cette dynamique, a pour objectif de concevoir et de réaliser un Smart Compteur hybride, capable de mesurer, de manière fiable et précise, la consommation de l'énergie électrique dans les deux modes de branchement cités précédemment. Ce système vise à offrir une solution polyvalente, adaptée aux environnements domestiques comme industriels, tout en intégrant des fonctionnalités modernes d'affichage local et de communication à distance [8].

II. ARCHITECTURE ET REALISATION DU SYSTEME

La conception du compteur intelligent hybride s'est appuyée sur une architecture modulaire intégrant les éléments suivants :

- Des modules de mesure PZEM-004T qui assurent la mesure des paramètres électriques clefs (tension, courant, puissance, énergie).
- Une carte ESP32 qui gère le traitement des données et la connectivité sans fil (Wi-Fi).
- Un écran LCD 20x4 qui permet l'affichage local des informations.
- Des relais de sélection de phases qui offrent la possibilité de commuter entre différentes phases d'alimentation.
- Des boutons de commande qui facilitent les opérations manuelles.
- Un module Wi-Fi qui assure la transmission des données vers un système de supervision distant.
- Un capteur de détection de capot ouvert qui ajoute un niveau de sécurité en détectant les ouvertures non autorisées.

L'ensemble a été réalisé en respectant les normes de sécurité électrique et les bonnes pratiques de câblage, garantissant la fiabilité et la robustesse du dispositif, Fig. 1.

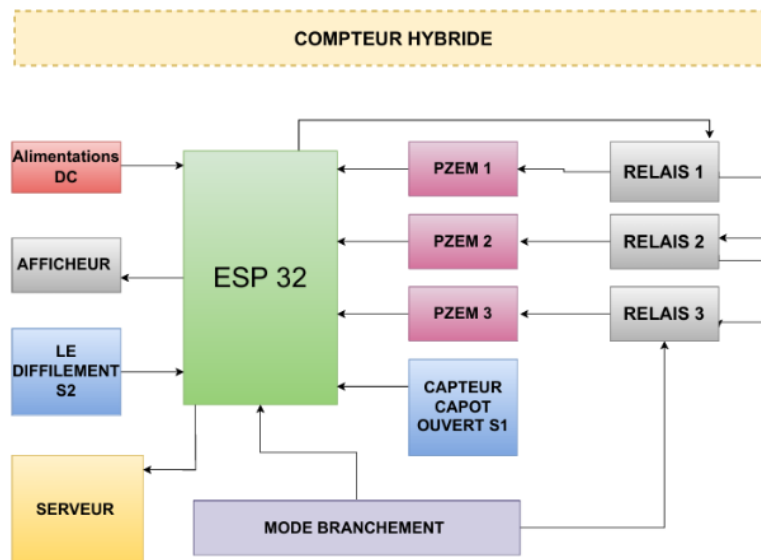


Fig. 1 : Schéma bloc du compteur intelligent

III. TESTS ET VALIDATION

Les tests de fonctionnement ont permis de valider les performances du système dans deux modes d'utilisation :

- Branchement direct : Utilisé pour des charges de faible puissance, permettant des mesures sans transformateurs externes. Le diagramme de connexion du Smart Meter en mode directe est représenté dans la figure Fig. 2.

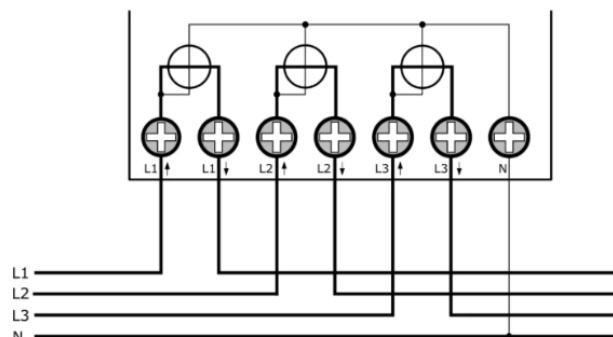


Fig. 2 : Diagramme de branchement direct du compteur intelligent

Ce type de branchement est utilisé pour les installations électriques de faible puissance, généralement inférieures à 12 kVA en monophasé et 36 kVA en triphasé. Dans ce cas, le compteur est connecté sans transformateur intermédiaire, ce qui signifie qu'il mesure directement la tension et le courant du réseau.

Cette méthode est simple et économique, car elle ne nécessite pas d'appareils supplémentaires comme des transformateurs de courant (TC). Elle est couramment employée dans les habitations individuelles, les petits commerces et les bureaux. Par exemple, un compteur monophasé standard (230 V) dans une maison est toujours branché directement.

Cependant, le branchement direct présente une limite de puissance. Si le courant dépasse la capacité nominale du compteur (par exemple 80 A), cela peut entraîner une surchauffe endommageant l'appareil. Il est donc crucial de vérifier que l'installation ne dépasse pas les limites autorisées.

Les résultats de mesure pour un branchement direct du compteur sont donnés par la figure Fig. 3.



Fig. 3 : Mesure avec le branchement direct du compteur intelligent

- Branchement indirect : intègre des transformateurs de courant pour les applications nécessitant des mesures sur des charges de forte puissance, Fig. 4.

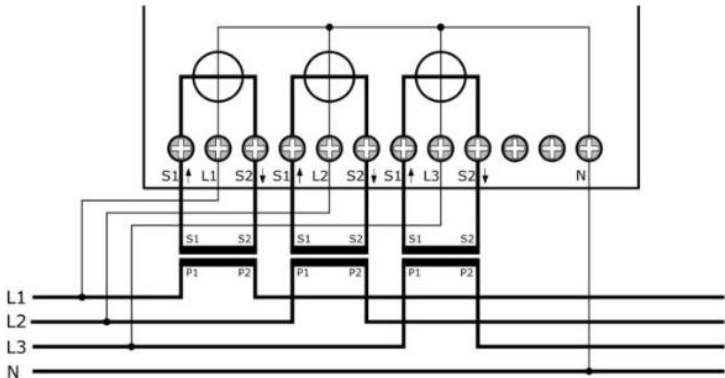


Fig. 4 : Diagramme de branchement indirect du compteur intelligent

Le branchement indirect est nécessaire pour les installations de forte puissance, comme les usines, les grands bâtiments ou les réseaux haute tension. Dans ce cas, le compteur est connecté via des transformateurs de courant (TC) et parfois des transformateurs de tension (TT). Ces dispositifs réduisent le courant et la tension à des valeurs mesurables par le compteur, tout en assurant une isolation électrique. Par exemple, un transformateur de courant avec un ratio 150/5A, signifie qu’une intensité de courant de 150A en entrée sera réduite à 5A en sortie. Le compteur doit alors multiplier la mesure par un facteur (ici, 25) pour obtenir la consommation réelle. Cette méthode permet de mesurer des courants très élevés (plusieurs centaines d'ampères) en toute sécurité.

L'installation d'un branchement indirect est plus complexe et coûteuse en raison des TC/TT et de leur calibration. Une erreur de câblage ou de calibration peut fausser les mesures, ce qui impose un contrôle rigoureux lors de la mise en service. Le diagramme de branchement indirecte du compteur intelligent est donné par la Fig. 4. Les résultats de mesure pour un branchement indirect du compteur intelligent, sont donnés par la figure Fig. 5.



Fig. 5 : Mesure avec le branchement indirect du compteur intelligent

A. Smart Meter Hybride

Un compteur hybride représente la solution idéale pour les installations électriques nécessitant une grande flexibilité de branchement. Ce dispositif innovant peut fonctionner aussi bien en mode direct qu'indirect, s'adaptant ainsi aux différentes configurations et puissances.

En branchement direct, il se connecte simplement au circuit sans équipement intermédiaire, parfait pour les habitations et petits commerces avec des puissances inférieures à 36 kVA. Cette configuration offre l'avantage d'une installation rapide et économique. Pour les installations plus puissantes, le mode indirect avec

transformateurs de courant (TC) permet de mesurer avec précision des intensités élevées tout en protégeant l'appareil.

Les compteurs hybrides modernes intègrent des fonctionnalités avancées comme la télérelève et l'analyse de la qualité de l'énergie, quelle que soit leurs configurations. Sa conception modulaire facilite l'évolution des installations sans nécessiter de remplacement. Ces caractéristiques polyvalentes, ont entraîné un équipement adapté aussi bien aux projets résidentiels qu'industriels. La possibilité de basculer d'un mode à l'autre selon les besoins offre une solution pérenne et économique. Techniquement aboutis, ce compteur répond parfaitement aux exigences croissantes en matière de précision et de fiabilité des mesures électriques. Leur adoption croissante témoigne de leur adéquation avec les divers besoins du marché de l'énergie.

B. Branchement direct

Les mesures des tensions et des courants dans chaque phase sont effectuées par un multimètre de marque CHAUVIN ARNOUX de model F205. Les résultats des mesures manuelle sont donnés par la figure Fig. 6.

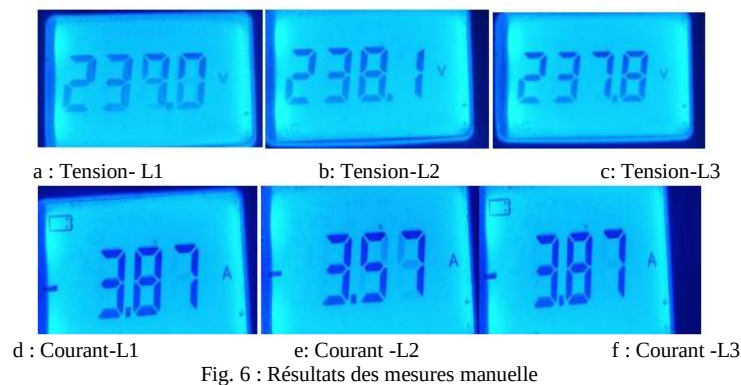


Fig. 6 : Résultats des mesures manuelle

C. Branchement indirect

Dans cet essai, nous avons utilisé un transformateur de courant de rapport TC 150/5. Les mesures effectuées par un multimètre du marque CHAUVIN ARNOUX de model F205, sont donnés par la figure Fig. 7.

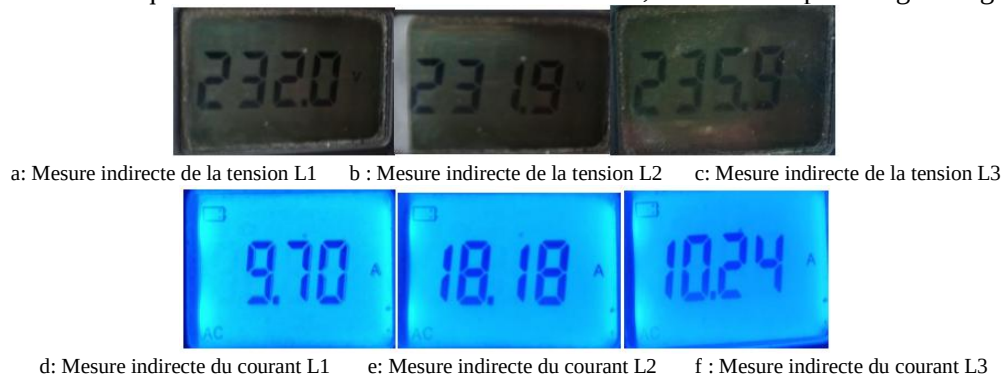


Fig. 7 : Résultats de mesure indirecte

Les essais ont porté sur plusieurs aspects :

- Précision des mesures : les grandeurs électriques mesurées (tension, courant, puissance active, énergie consommée) sont conformes aux attentes et aux tolérances spécifiées.
- Fiabilité et répétabilité : le système présente une bonne stabilité des mesures et une répétabilité améliorée par rapport aux méthodes traditionnelles.
- Sécurité et robustesse : l'intégration du capteur de capot ouvert renforce la sécurité, tandis que la conception matérielle tient compte de la protection contre les chocs et les interférences.
- Fonctionnalités avancées : la transmission des données en temps réel via Wi-Fi permet une surveillance continue des paramètres critiques tels que la tension, la puissance et la température. Cette fonctionnalité ouvre la voie à la maintenance préventive et à l'optimisation du rendement énergétique.

IV. RESULTATS ET DISCUSSION

Les résultats obtenus démontrent les bénéfices suivants :

- Réduction significative du temps de cycle des opérations de mesure et de diagnostic.
- Amélioration de la précision et de la fiabilité des données énergétiques collectées.
- Diminution des erreurs humaines grâce à l'automatisation des processus de lecture et de surveillance.
- Possibilité d'intégrer le système dans des plateformes IoT pour une gestion énergétique centralisée.
- Facilitation de la maintenance préventive grâce à l'accès en temps réel aux données critiques.

Ces avantages contribuent directement à l'amélioration de l'efficacité énergétique et à la modernisation des infrastructures électriques, en ligne avec les exigences des Smart Grids.

Bien que le compteur intelligent développé remplisse ses fonctions principales de mesure, d'affichage local et de transmission des données vers un serveur, certaines limites persistent. Premièrement, la précision des mesures en mode indirect dépend fortement du facteur de transformation des transformateurs de courant, ce qui peut introduire une erreur si celui-ci n'est pas bien calibré. Deuxièmement, la détection des anomalies (comme les pertes de courant ou les défauts d'installation) n'est pas encore implémentée. Par ailleurs, l'interface web reste basique et pourrait être enrichie avec des graphes interactifs, une gestion multi-utilisateur et des alertes intelligentes. La sécurité de la communication WiFi devrait également être renforcée par l'ajout d'un protocole d'authentification sécurisé.

V. CONCLUSION

La réalisation et la validation du compteur intelligent hybride confirment la faisabilité et l'efficacité de cette approche pour la mesure intelligente de la consommation énergétique. Le système proposé se distingue par sa précision, sa robustesse et sa capacité à fournir des données en temps réel, essentielles pour la gestion optimisée des réseaux électriques. Nous avons effectué la communication Wi-Fi pour l'envoi des données vers un serveur MySQL distant. L'implémentation d'un système d'alerte (capot ouvert) est via un bouton poussoir.

Des perspectives d'évolution incluent l'intégration de fonctionnalités de traitement embarqué, l'exploitation avancée des données (analyse prédictive) et l'extension à des environnements industriels de grande échelle.

Enfin, des améliorations futures peuvent inclure L'intégration d'une intelligence artificielle pour prédire la consommation ou détecter des comportements anormaux. L'ajout d'un module de télégestion permettant un contrôle à distance du compteur. Le support du protocole HTTPS pour une meilleure compatibilité avec les plateformes IoT. L'extension vers un système multi-compteurs pour les installations industrielles.

REFERENCES

- [1] Babic, M. (2024). *Green finance in the global energy transition: Actors, instruments, and politics*. Energy Research & Social Science, 111, 103482.
- [2] Bessalem, C., Diemer, A., Batisse, C., & BENAMARA, M. (2022). *Les transitions énergétiques à l'horizon 2030 et 2050, le retour en grâce des scénarios et de la prospective*. Revue francophone du développement durable, (19), 1-67.
- [3] Hassan, Q., Viktor, P., Al-Musawi, T. J., Ali, B. M., Algburi, S., Alzoubi, H. M., ... & Jaszczur, M. (2024). *The renewable energy role in the global energy Transformations*. Renewable Energy Focus, 48, 100545.
- [4] Rahman, M. A., Islam, M. R., Hossain, M. A., Rana, M. S., Hossain, M. J., & Gray, E. M. (2024). *Resiliency of forecasting methods in different application areas of smart grids: A review and prospects*. Engineering Applications of Artificial Intelligence, 135, 108785.
- [5] Zheng, Z., Shafique, M., Luo, X., & Wang, S. (2024). *A systematic review towards integrative energy management of smart grids and urban energy systems*. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 189, 114023.
- [6] Hassan, Q., Hsu, C. Y., Mounich, K., Algburi, S., Jaszczur, M., Telba, A. A., ... & Barakat, M. (2024). *Enhancing smart grid integrated renewable distributed generation capacities: Implications for sustainable energy transformation*. Sustainable Energy Technologies and Assessments, 66, 103793.
- [7] Morello, R., Fulco, G., Mukhopadhyay, S., Fabbiano, L., & De Capua, C. (2024). *Time synchronised power meters for advanced smart distribution of energy in smart grids*. IEEE Sensors Journal.
- [8] Koukouvinos, K. G., Koukouvinos, G. K., Chalkiadakis, P., Kaminaris, S. D., Orfanos, V. A., & Rimpas, D. (2025). *Evaluating the Performance of Smart Meters: Insights into Energy Management, Dynamic Pricing and Consumer Behavior*. Applied Sciences, 15(2), 960..