

Architecture de Nœud basse Consommation et Intelligent pour des Réseaux de Capteur

Yassine Faize¹, Jérémie Crenne², Nicolas Hanusse³, Christophe Jégo²
yassine.faize@u-bordeaux.fr

(1) Laboratoire IMS-UMR 5218, Université de Bordeaux, Talence, 33405, France

(2) Laboratoire IMS-UMR 5218, Université de Bordeaux, Bordeaux INP, Talence, 33405, France

(3) CNRS-LaBRI-UMR-5800, Université de Bordeaux, Talence, 33405, France

RESUME : Les réseaux de capteurs sont un véritable atout pour réduire la consommation d'énergie et l'empreinte carbone des universités. En effet, ces derniers sont particulièrement appropriés pour superviser la consommation et les activités d'un bâtiment. Afin de faciliter la conception de capteurs autonomes et sans fil, cet article présente une approche qui comprend un modèle architectural de nœud de capteurs associé à un modèle de consommation d'énergie. L'architecture de nœud présentée comprend un système de récupération d'énergie solaire et une radio de réveil pour augmenter l'autonomie tout en gardant une qualité de service suffisante. Les nœuds ont été déployés dans des bâtiments universitaires. Ainsi, de véritables expériences ont été menées afin de valider l'approche proposée. Ainsi, le modèle de consommation a une erreur d'estimation inférieure à 2% par rapport aux expérimentations. En extrapolant les résultats des nœuds basés sur le modèle d'architecture proposé, l'expérience sur le terrain prévoit une durée de vie virtuellement illimitée.

Mots clés : Objet connecté, Réseau de capteurs, Récupération d'énergie, Wake-up Radio, Campus intelligents.

I. INTRODUCTION

Les réseaux de capteurs sans fil permettent de surveiller la consommation énergétique (eau, chauffage et électricité) de bâtiments afin de réduire leur empreinte carbone et leurs coûts d'exploitation. Ils impliquent des choix de conception et la mise en œuvre de composants matériels et logiciels appropriés [1]. Le déploiement d'un réseau filaire augmentant les coûts d'infrastructure, les efforts de recherche se sont concentrés sur les réseaux de capteurs sans fil. Leurs emplacements géographiques et leurs applications impliquent un choix de radio adéquat, avec une portée pouvant varier de quelques mètres à plusieurs kilomètres, comme pour les réseaux LPWAN [2]. L'alimentation est également une contrainte importante dans les réseaux de capteurs. Si la consommation d'énergie est élevée et que les nœuds doivent toujours être alimentés, cas des Supersensors de l'Université de Glasgow [3], le positionnement des capteurs est alors limité par les emplacements de prises électriques. Les réseaux de capteurs autonomes et sans fil sont une opportunité indéniable pour équiper un campus à moindre coût. De plus, ce travail tend à répondre au projet SmartCampus de l'Université de Bordeaux visant à établir son premier réseau de capteurs, respectant les spécifications suivantes :

1) Les capteurs doivent être autonomes et offrir une durée de vie d'au moins cinq ans $\pm 5\%$, avec une qualité de services (QDS) adéquate.

2) Les capteurs doivent être sans fil afin de limiter les coûts de génie civil.

3) Les capteurs sont dédiés à la surveillance et à la gestion de l'énergie et au confort intérieur.

Dans le cadre de cette étude, la QDS est définie par la capacité des capteurs à surveiller la consommation d'énergie et le confort intérieur avec la fréquence d'acquisition la plus élevée possible tout en conservant une

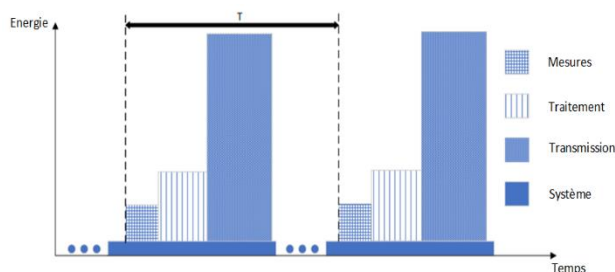


Fig 1. Fonctionnement Duty-cycle classique

durée de vie supérieure à cinq ans. Classiquement, les réseaux de capteurs classiques sont basés sur un Duty-Cycle (DC) [4]. Cela signifie qu'un nœud se réveille à une fréquence fixe pour réaliser une mesure, effectuer un traitement si nécessaire, l'envoyer à une passerelle puis revenir en mode basse consommation comme indiqué dans la Figure 1. La récupération d'énergie (RE) permet d'étendre la durée de vie du nœud grâce à de l'énergie collectée dans l'environnement [5], [6]. Parmi les solutions potentielles, les panneaux photovoltaïques offrent une bonne efficacité pour les usages extérieurs mais pas nécessairement pour un déploiement en intérieur [7]. Les différences d'efficacité extérieure et intérieure impliquent une augmentation rapide des délais et des coûts de conception des nœuds lorsque des capteurs autonomes et sans fils doivent être déployés dans une infrastructure hétérogène. Un domaine d'étude complémentaire est la proposition de modèles analytiques pour estimer les consommations et les durées de vie des nœuds [8]. Les composants hardware, leur consommation et les protocoles utilisés, rendent difficile la possibilité d'avoir un modèle global et générique pour toute architecture de nœud et de réseau. C'est pourquoi la plupart des modèles de la littérature sont basés sur une architecture spécifique. Les travaux précédents, y compris la récupération d'énergie, sont axés sur le déploiement

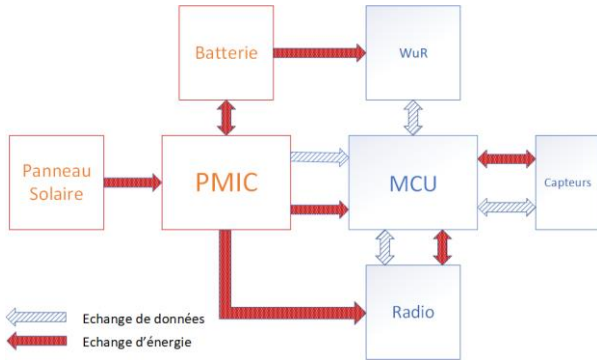


Fig 2. Model architectural du nœud proposé

soit extérieur, soit intérieur [9]. Afin d'apporter des solutions à ces inconvénients et minimiser les coûts et délais de développement de réseaux hétérogènes pour campus intelligents, l'approche de conception suivante est proposée. En résumé, cet article contient deux contributions distinctes : une architecture de nœuds efficace axée sur la récupération d'énergie et une Wake-up Radio (WuR) et un modèle de consommation pour estimer la durée de vie des nœuds avant le déploiement. L'ajout d'une WuR offre une meilleure gestion énergétique des nœuds et du réseau.

II. ARCHITECTURE DU NŒUD

Cette section décrit un modèle architectural de nœud associé à des composants matériels pour une conception évolutive, économe énergétiquement et raisonnable financièrement. Pour répondre aux spécifications présentées dans l'introduction de cet article, ce modèle est basé sur à la fin une WuR et sur de la récupération d'énergie comme le montre la Figure 2.

A. Récupération d'énergie dans l'architecture de nœud

Pour réduire la consommation énergétique des nœuds, un module de récupération d'énergie exploitant des sources naturelles est nécessaire. Les panneaux solaires sont une bonne solution en raison de leur capacité à collecter l'énergie de la lumière (naturelle ou artificielle) à l'aide de cellules photovoltaïques. Le Maximum Power Point Tracking (MPPT) permet de générer le maximum d'énergie en toute circonstance, à l'aide d'algorithmes spécifiques comme décrit dans [10]. L'efficacité du panneau solaire représente la capacité de la cellule à transformer l'énergie d'entrée en énergie utilisable. La taille du panneau induit une limite dans l'énergie générée et dans la taille des nœuds, qui ne peuvent être plus petits que la surface du panneau solaire.

Le Power Manager IC (PMIC) doit être bidirectionnel. Lorsque le panneau solaire produit suffisamment d'énergie, il alimente le nœud et stocke le surplus d'énergie dans une batterie. Lorsqu'il ne produit pas assez d'énergie, le PMIC puise le complément dans la batterie. La possibilité de couper l'alimentation du nœud à l'aide d'une commande est une fonctionnalité supplémentaire.

Cela permet de remplacer les états de veille par des états non alimentés. Cette option est efficace seulement si l'énergie requise pour mettre sous tension le microcontrôleur (MCU). Cette énergie doit être inférieure à celle consommée pour une période de sommeil donnée.

Comme le montre la Figure 2, une batterie est présente dans notre modèle architectural. Certains travaux antérieurs proposent d'utiliser la récupération d'énergie avec des nœuds sans batterie [11]. Cependant, lorsqu'aucune énergie n'est collectée, le nœud est généralement éteint. Dans de mauvaises conditions, la QDS peut rapidement baisser et se rapprocher de zéro. Une durée de vie de cinq ans garantissant une bonne qualité de service implique que la batterie devrait permettre au moins plusieurs jours de fonctionnement. Ainsi, lorsqu'aucune énergie ne peut être récoltée pendant plusieurs jours, le nœud peut toujours fonctionner jusqu'à ce que de l'énergie puisse être à nouveau collectée.

B. Partie de traitement dans l'architecture de nœud

La WuR réveille le nœud lorsqu'un Wake-up Beacon (WuB) est reçu. En mode DC, lorsqu'apparaissent des problèmes de synchronisation entre les nœuds et la passerelle, le temps nécessaire en mode de réception (Rx) pour recevoir les données de la passerelle est augmenté. Comme dans [12], de nombreux travaux ont tendance à présenter des architectures de WuR où la puissance, le canal et les méthodes d'adressage diffèrent. Dans le modèle proposé, la WuR est basée sur une méthode d'identification. Un WuB, contenant un code d'identification est utilisé pour adresser un nœud spécifique sans surconsommation d'énergie dans les autres nœuds. Il doit également communiquer avec le MCU pour le réveiller et transmettre une commande reçue depuis la passerelle. Selon le traitement associé au nœud, la puissance calculatoire du MCU doit être suffisante pour gérer toutes les tâches (mesure, traitement, transmission ou réception). Différents microcontrôleurs sont disponibles avec des spécificités (fréquences d'horloge, mémoire, sécurité ou consommations énergétique). Même si chaque ressource n'est pas utilisée au stade du déploiement, cela permet une évolutivité et des améliorations de services.

Le module radio permet au nœud de communiquer sans fil avec les passerelles. Il peut être alimenté par le MCU ou le PMIC. Les fréquences et le débit dépendent de la technologie RF choisie. Plus la fréquence est élevée, plus la portée est courte mais avec un débit plus élevé. Un débit plus élevé et une portée plus élevée, implique une consommation importante. Le nombre maximum de nœuds par point d'accès est aussi limité selon la technologie utilisée.

Enfin, le choix des capteurs, composants matériels permettant de mesurer des quantités physiques, caractérise l'architecture proposée. Ils communiquent avec le MCU qui les configure et les alimente. Le MCU envoie également des commandes pour prendre des mesures. A noter qu'un grand nombre de capteurs implique une disparité importante dans les consommations d'énergie.

III. MODELE DE CONSOMMATION

Dans la méthodologie de conception proposée, la seconde contribution majeure est un modèle mathématique pour estimer la durée de vie des nœuds. Si le résultat est convaincant pour l'application, le réseau est ensuite déployé avec la troisième étape. Dans le cas contraire, une mise à jour des composants matériels ou une révision du cahier des charges est nécessaire. Afin de simplifier le modèle analytique, les hypothèses suivantes sont faites :

- 1) la radio principale et la WuR ne partagent pas le même canal.
- 2) la WuR inclut l'adressage. Lorsqu'un WuB est envoyé, seul le nœud de destination est réveillé.
- 3) la topologie du réseau et le protocole de routage n'ont pas d'impact sur la consommation énergétique.
- 4) les interférences radio et les pertes de paquets pendant la transmission ne sont pas prises en compte.

Ce modèle est divisé en une première partie permettant d'estimer la durée de vie maximale des nœuds dans le pire des cas, c'est-à-dire lorsque de l'énergie n'est pas récoltée. Une deuxième partie évalue la durée de vie du nœud avec de la récupération d'énergie. Aucun nœud de relais n'est pris en compte. Chaque WuB est envoyé par la passerelle, chacune gérant des sous-parties du réseau. Lorsqu'un nœud spécifique doit être réveillé pour exécuter une tâche, le WuB envoyé contient l'ID d'un nœud et un code d'opération. Ce paquet est reçu par chaque WuR et prétraité. Si l'ID correspond au nœud lui-même, une commande est envoyée au MCU pour le réveiller. Il convient de noter que même dans le cas d'une fausse adresse, de l'énergie est consommée pour le processus de vérification. Dans une configuration à base de WuR, la fréquence de réveil d'un nœud n'est pas fixe, dépendant de l'application.

Définissons T_{min} , le temps minimal entre deux réveils consécutifs d'un nœud. Dans le pire des cas, la passerelle ne peut pas solliciter un même nœud plus d'une fois par période de temps T_{min} . Il peut donc être associé à un schéma DC avec une période de T_{min} . La consommation du nœud émetteur (SN) au réveil peut être exprimée comme suit :

$$E_{SN} = E_{Sys} + E_{Acq} + E_{Prc} + E_{Tx} + E_{WuB,Rx} \quad (1)$$

E_{Sys} dépend des spécifications du MCU et de son niveau de consommation à l'état de repos. Lorsque les mesures sont effectuées, le nombre d'acquisitions et les composants matériels du capteur ont un impact sur l'énergie consommée. Elle correspond à E_{Acq} . Ensuite, une étape de traitement (E_{Prc}) est effectuée par le MCU, pour manipuler les données et exécuter des opérations locales avant une transmission. Enfin, les données peuvent être transmises. Cette transmission implique une consommation E_{Tx} . Lorsque le nœud a terminé ses tâches, il peut être placé dans un mode basse consommation, où elle est

réduite en attendant de se réveiller. L'équation (1) devient :

$$E_{SN} = E_{Sys} + E_{Acq} + E_{Prc} + E_{Tx} + E_{WuB,Rx} + E_{Sleep} \quad (2)$$

Si le MCU est mis en mode veille, une quantité d'énergie E_{Sleep} est consommée. Si le MCU est éteint, l'énergie consommée entre deux réveils est réduite à l'énergie consommée par la WuR et E_{Sleep} est égale à zéro. Enfin, en utilisant l'équation (2), la durée de vie moyenne d'un nœud peut être estimée avec récupération d'énergie. La consommation PMIC est incluse dans $E_{Harvested}$. La consommation peut alors être exprimée par l'équation suivante :

$$E_{SN} = E_{SYS} + E_{ACQ} + E_{PRC} + E_{Tx} + E_{WuB;Rx} + E_{Sleep} - E_{Harvested} \quad (3)$$

$E_{Harvested}$ doit être calculé pour l'équation (3). L'énergie d'entrée du panneau solaire doit être estimée. Pour ce faire, les situations de déploiements extérieurs et intérieurs doivent être distingués.

Déploiement en intérieur : Il est possible d'estimer l'énergie solaire récupérée en utilisant une valeur théorique ou en mesurant de l'éclairage d'une pièce. En raison des différents types de pièces disponibles dans un campus, il serait difficile d'estimer ou de mesurer avec précision cette grandeur. Pour résoudre cette difficulté, les nœuds intérieurs ont été fixés directement aux luminaires. L'approximation de l'énergie lumineuse émise par l'éclairage, la distance maximale du panneau solaire et l'occupation moyenne de la pièce permettent une estimation de l'énergie pouvant être récoltée.

Déploiement en extérieur : Deux types de références peuvent être exploités pour l'estimation du rayonnement solaire. Tout d'abord, une estimation à partir des données de rayonnement comme celles fournies par le Photovoltaic Geographical Information System (PVGIS) des services scientifiques internes de la Commission européenne. Elle repose sur les données satellites pour estimer le rayonnement solaire à la surface de la Terre. Par ailleurs, il est possible de réutiliser des données de mesures réelles des années précédentes pour calculer un rayonnement estimé pour les mois ou les années suivantes.

Ces équations permettent d'estimer relativement, la durée de vie d'un nœud avant de déployer un réseau de capteurs.

IV. EXPERIMENTATIONS

La méthodologie proposée a été réalisée afin de vérifier la pertinence de la proposition.

| Composant | Modèle |
|-----------------|-----------------------------|
| Panneau solaire | IXYS SLMD121H10L |
| Batterie | 190mAh 3.7V Li-Po |
| PMIC | E-PEAS AEM10941 |
| MCU | Nordic Semi nrf52840 |
| Radio | Nordic Semi nrf52840 |
| Capteurs | BOSCH BME280 |
| WuR | Raspberry PI 3 |

Tableau I. Composants matériels du nœud expérimental

A. Récupération d'énergie dans l'architecture du nœud

Le nœud expérimental est basé sur des composants discrets comme indiqué dans le tableau I. Cela montre l'évolutivité de la méthode sachant qu'une carte avec composant intégré est plus efficace. Elle permet également de valider l'estimation de la consommation du modèle proposé. Zephyr OS est utilisé pour faciliter le développement d'applications [13]. La consommation du nœud déployé est mesurée pour être au plus proche des cas d'utilisation réels. Les mesures de consommation énergétique ont donné les valeurs suivantes : $0,15 \mu\text{J}/\text{ms}$ pour E_{Sys} , $43 \mu\text{J}$ pour E_{Acq} et $158 \mu\text{J}$ pour E_{Tx} . $E_{\text{Pré}}$ varie en fonction de l'application. Dans ce cas, une simple accumulation de données a été effectuée. Cette application ayant une consommation négligeable devant E_{Sys} , La même consommation d'énergie a été considérée pour les deux tâches.

B. Résultats de l'estimation de la durée de vie

Une fois les consommations mesurées, la durée de vie peut être évaluée à partir de ces valeurs. Le modèle énergétique a été implémenté en utilisant Python 3.7. Dans cette expérience, la durée de vie du scenarii suivant a été étudiée. Toutes les 10 minutes, le nœud se réveille et le MCU récupère des mesures de température, d'humidité et de pression puis accumule les données. Les données sont ensuite transmises par BLE 5.2 en mode broadcast. Un paquet est envoyé toutes les 650 millisecondes pendant 5 secondes. Ces valeurs ont été fixées afin de prévoir un contexte où le nœud devrait envoyer les données plusieurs fois. Une fois terminé, le système reste réveillé pendant 3 minute. Ensuite, le MCU s'éteint après avoir envoyé une commande au PMIC pour éteindre l'alimentation du MCU. Enfin, la passerelle attend 7 minutes supplémentaires avant de réveiller le nœud. Pour la première partie du modèle, le nœud est associé à un nœud basé sur un fonctionnement DC pour fournir la pire estimation de durée de vie. Pour la partie récupération d'énergie, les données mesurées proviennent d'une station WRMC-BSRN basée à l'Observatoire SIRTa à Palaiseau en France [14]. Elles permettent d'obtenir une estimation de l'énergie récoltée pour les nœuds extérieurs.

| Période (min) | Durée de vie (jours) | | |
|---------------|----------------------|---------------------------|---------------------------|
| | Sans panneau solaire | Avec panneau solaire (5s) | Avec panneau solaire (1s) |
| 5 | 28 | 42 | 182 |
| 10 | 49 | 118 | ∞ |
| 15 | 66 | 288 | ∞ |
| 20 | 79 | 1039 | ∞ |
| 25 | 90 | ∞ | ∞ |

Tableau II. Estimation de durée de vie du nœud

Pour les nœuds intérieurs, l'expérience a été réalisée à l'aide des tubes fluorescents Philips TLD 58W / 827 déployés dans une salle. Le fabricant annonce un rendement lumineux de 5240 lumens. Nous considérons une occupation de 8 par jour pendant 5 jours. Le tableau II récapitule des estimations de durée de vie pour différentes périodes de réveil. Il affiche également les résultats pour des durées de transmission de 1 et 5 secondes.

C. Résultats des expérimentations

Afin de valider le modèle, un nœud complet a été déployé. Dans un premier temps sans panneau solaire pour le cas sans récupération d'énergie. Dans un second temps, un panneau solaire a été ajouté en intérieur puis en extérieur orienté sud. Dans le pire des cas, le nœud a fonctionné pendant 28,13 jours, avec une erreur de 1,44% par rapport à la durée de vie estimée. Pour une estimation de durée de vie de cinq ans, cela signifie une erreur de 26,28 jours, validant les spécifications demandées. Sur la Figure 3.b), le nœud extérieur commençant par un niveau de batterie proche de zéro, la batterie a été rechargée en moins d'un jour avant d'atteindre un seuil du PMIC nécessaire pour activer l'alimentation du MCU. Ensuite, l'énergie récoltée pendant une journée était en surplus pour un fonctionnement pendant 24 heures. La batterie était complètement chargée après 7 jours et est restée dans ce niveau de charge les jours suivants, comme illustré à la figure 3. Cela démontre l'adéquation avec la durée de vie virtuellement illimitée estimée. Pour les expérimentations en intérieur, 10 jours de fonctionnement sont présentés sur la Figure 3.a). La pièce où il était déployé était occupée tous les jours sauf le week-end. Avec une moyenne d'occupation de 8 heures, la lumière artificielle était suffisante pour que le nœud fonctionne pendant 24 heures. Une baisse du niveau de la batterie peut être observé le week-end dû l'inoccupation de la pièce. Mais cela est rapidement compensé les jours suivants.

V. CONCLUSION

Une expérimentation a été faite pour des capteurs sans fil évolutifs et écoénergétiques basés sur la récupération d'énergie. Un modèle d'architecture évolutif et hétérogène est défini pour la plupart des applications de surveillance d'un campus intelligent. Associé à un modèle de consommation d'énergie, il aide le concepteur à estimer la durée de vie des nœuds pour un déploiement à la fin extérieur et intérieur. Il exploite les données de

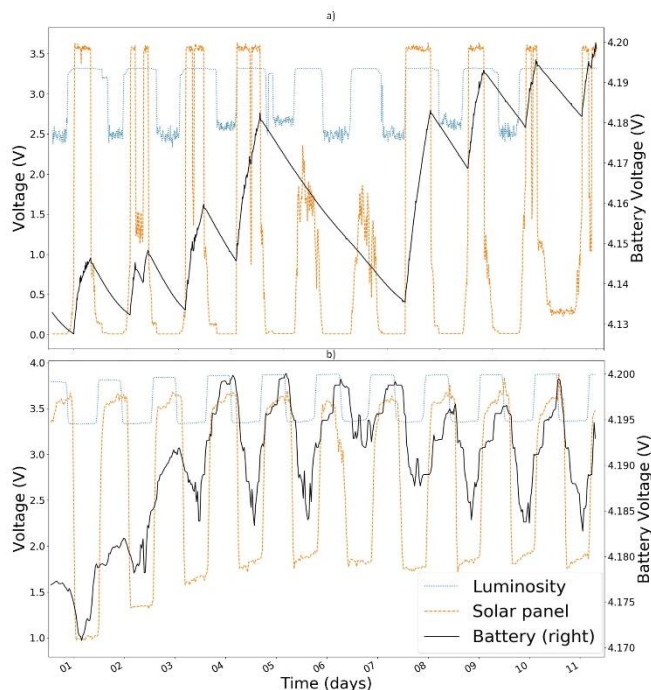


Fig3. a) Tensions du nœud déployé en intérieur pendant 10 jours. b) Tensions du nœud déployé en extérieur pendant 10 jours.

rayonnement solaire basées sur les radiations des années précédentes. D'autre part, une étude est prévue pour estimer la limite des hypothèses faites sur la prédiction de la durée de vie du nœud. Pour optimiser cette solution, un travail est en cours pour estimer et prédire les valeurs observées en utilisant conjointement les données historiques et celles des nœuds voisins. Ainsi, si un nœud n'a pas suffisamment d'énergie pour communiquer, une valeur estimée est calculée et envoyée à une infrastructure cloud, en attendant que les nœuds récoltent l'énergie suffisante pour être interrogé. Il permet d'adapter la période de réveil du nœud et ainsi encore augmenter la durée de vie du réseau de capteurs.

Bibliographie

- [1] T. Arsan, "Smart Systems: From design to implementation of embedded Smart Systems," *2016 HONET-ICT, Nicosia, Cyprus, Oct. 2016*, pp.59–64, doi: 10.1109/HONET.2016.7753420.
- [2] M. Centenaro, L. Vangelista, A. Zanella, and M. Zorzi, "Long-range communications in unlicensed bands: the rising stars in the IoT and smart city scenarios," *IEEE Wireless Commun.*, vol. 23, no. 5, pp. 60–67, Oct. 2016, doi: 10.1109/MWC.2016.7721743.
- [3] K. Hentschel, D. Jacob, J. Singer, and M. Chalmers, "Supersensors: Raspberry Pi Devices for Smart Campus Infrastructure," *2016 IEEE 4th International Conference on Future Internet of Things and Cloud (FiCloud), Vienna, Austria, Aug. 2016*, pp. 58–62, doi: 10.1109/Fi-Cloud.2016.16.
- [4] R. C. Carrano, D. Passos, L. C. S. Magalhaes, and C. V. N. Albuquerque, "Survey and Taxonomy of Duty Cycling Mechanisms in Wireless Sensor Networks," *IEEE Commun. Surv. Tutorials*, vol. 16, no. 1, pp. 181–194, 2014, doi: 10.1109/SURV.2013.052213.00116.
- [5] R. Vullers, R. Schaijk, H. Visser, J. Penders, and C. Hoof, "Energy Harvesting for Autonomous Wireless Sensor Networks," *IEEE Solid-State Circuits Mag.*, vol. 2, no. 2, pp. 29–38, 2010, doi:10.1109/MSSC.2010.936667.
- [6] J. Nicot, L. Fadel, and T. Taris, "An RF-Powered IoT Node for Environment Sensing," *2019 IEEE Wireless Power Transfer Conference (WPTC), London, United Kingdom, Jun. 2019*, pp. 301–306, doi:10.1109/WPTC45513.2019.9055528.
- [7] S. Biswas and H. Kim, "Solar Cells for Indoor Applications: Progress and Development," *Polymers*, vol. 12, no. 6, p. 1338, Jun. 2020, doi:10.3390/polym12061338.
- [8] J. Aranda, M. Schölzel, D. Mendez, and H. Carrillo, "An Energy Consumption Model for Multi-Modal Wireless Sensor Networks based on Wake-up Radio Receivers," *2018 IEEE Colombian Conference on Communications and Computing (COLCOM), May 2018*, pp. 1–6, doi:10.1109/ColComCon.2018.8466728.
- [9] M. Mabon, M. Gautier, B. Vrigneau, M. L. Gentil, O. Berder, "The Smaller the Better: Designing Solar Energy Harvesting Sensor Nodes for Long-Range Monitoring," *Wireless Communications and Mobile Computing, Hindawi Publishing Corporation, Jul 2019*, pp.1–11, doi:10.1155/2019/2878545.
- [10] I. Yadav, S. Maurya, and G. Gupta, "A Literature review on industrially accepted MPPT techniques for solar PV system," *International Journal of Electrical and Computer Engineering (IJECE)*, vol. 10, p. 2117, Apr. 2020, doi: 10.11591/ijece.v10i2.pp2117-2127.
- [11] J. Hester and J. Sorber, "The Future of Sensing is Batteryless, Intermittent, and Awesome," *Proceedings of the 15th ACM Conference on Embedded Network Sensor Systems, Delft Netherlands, Nov. 2017*, pp.1–6, doi: 10.1145/3131672.3131699.
- [12] R. Piyare, A. L. Murphy, C. Kiraly, P. Tosato, and D. Brunelli, "Ultra Low Power Wake-Up Radios: A Hardware and Networking Survey," *IEEE Commun. Surv. Tutorials*, vol. 19, no. 4, pp. 2117–2157, 2017, doi: 10.1109/COMST.2017.2728092.
- [13] ZephyrProject.ZephyrOS.[Online]. Available: <https://www.zephyrproject.org/>
- [14] Driemel, A., Augustine, J., Behrens: Baseline Surface Radiation Network (BSRN): structure and data description (1992–2017), *Earth Syst. Sci. Data*, 10, 1491–1501, doi:10.5194/essd-10-1491-2018, 2018.