



Mesures et Modèle Énergétique d'un Nœud de Réseaux de Capteurs sans Fils

Román Igual-Pérez^{1,3}, Alexandre Boé^{1,3}, Thomas Vantroys^{2,3}, Laurent Clavier^{1,4}

¹ IEMN – CNRS UMR 8520, Institut d'Électronique, de Microélectronique et de Nanotechnologie, F-59000 Lille

² CRISTAL - CNRS UMR 9189, Centre de Recherche en Informatique Signal et Automatique de Lille, F-59000 Lille

³ Université Lille 1

⁴ Télécom Lille

roman.igual@ircica.univ-lille1.fr

Mots clés: consommation-énergie, mesures, modèle, réseaux-capteurs; *energy-consumption, measurements, model, WSN.*

Résumé

La contrainte de l'énergie est toujours présente dans les réseaux de capteurs sans fil. Il est pourtant difficile d'étudier cette consommation *in situ* car le nombre de paramètres l'impactant est considérable. Nous proposons une plate-forme de mesure du courant, composant par composant, qui nous permet d'étudier en détail le comportement de chaque élément d'un nœud du réseau. Un modèle de l'énergie consommée est créé et paramétré de façon automatique à partir des mesures effectuées dans l'environnement réel d'utilisation du nœud. Le modèle est composé d'une chaîne de Markov dont les états sont définis par les courants consommés et sa durée. Il nous permet d'analyser l'efficacité énergétique des nœuds. Ce système a été testé et donne une erreur moyenne de $\pm 0.6\%$ sur la durée de vie des nœuds par rapport aux mesures.

Introduction

Le nombre d'objets connectés augmente prodigieusement jour après jour et devrait atteindre 50 milliards en 2020 [1]. La plupart de ces dispositifs sont alimentés par des batteries dont le remplacement périodique est un facteur limitant. La solution à ce problème doit être anticipée avec une étude approfondie de l'efficacité énergétique selon trois axes : récupération, stockage et consommation. L'objectif final est d'optimiser l'utilisation de l'énergie pour obtenir des nœuds de réseaux de capteurs totalement autonomes.

Le présent travail s'intéresse à l'étude de la consommation. Nous avons créé une plate-forme de mesure de l'énergie consommée par un objet connecté. Les deux dispositifs, le circuit électronique du nœud étudié et la plate-forme de mesure de l'énergie sont connectés afin de récupérer des données à la fois analogiques et numériques. Les mesures sont réalisées par la partie analogique en temps réel et composant par composant. Dans le même temps, des indicateurs sont introduits dans le code du microcontrôleur (μC) du nœud afin de connaître à chaque moment la fonction exécutée par le code. Ces indicateurs sont identifiés par la plate-forme de mesure grâce à une connexion entre différentes entrées/sorties numériques des deux μC .

Un algorithme qui analyse les valeurs d'énergie a été développé. Cet algorithme permet la création automatique d'un modèle énergétique à partir de mesures réelles. Le modèle est dérivé d'un modèle markovien où les différentes données statistiques de courant électrique pour chacun des composants électroniques dans le nœud ainsi que les valeurs du temps sont prises en compte. Les états du modèle ainsi que les probabilités de transitions entre les états sont estimés automatiquement. À partir du modèle, une estimation réaliste de la durée de vie de la batterie d'un nœud est possible. De plus, avec les résultats obtenus à partir du modèle, nous pouvons tirer des conclusions pour modifier conjointement le logiciel et le matériel afin d'optimiser la consommation énergétique (Figure 1).

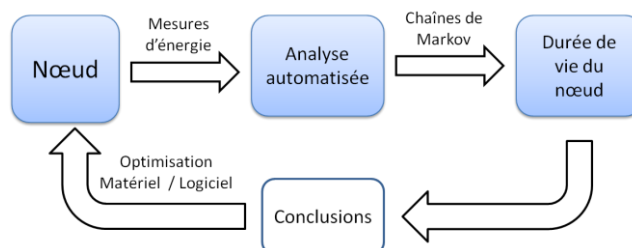


Figure 1 : Processus d'optimisation de l'énergie.

1. Plate-forme de mesure d'énergie

La Plate-forme de mesure d'énergie a été créée au laboratoire IRCICA. La méthode utilisée pour la mesure du courant s'appuie sur la différence de tension entre deux bornes d'une résistance à l'entrée du circuit. Plusieurs études utilisent d'autres approches comme un oscilloscope [2] ou des convertisseurs analogiques-numériques (CAN) [3] après l'amplification des valeurs de tension. Nous avons choisi d'amplifier la différence de tension individuellement pour chaque composant du nœud. L'étude de l'énergie consommée composant par composant est très importante afin de connaître leur comportement séparément selon le programme inclus dans le μC du nœud. Un CAN mesure les valeurs de tension amplifiées, qui sont stockées dans une mémoire externe au μC ou transmises via une communication série vers un ordinateur.

Les composants électroniques choisis pour la plate-forme de mesure de l'énergie sont des composants commerciaux à bas coût comme un μC ATmega328P qui comprend un CAN de 10 bits de résolution et 15 kSps de débit maximal, cinq amplificateurs ZXCT1086 et des résistances de différentes valeurs selon le courant maximal de chaque composant à évaluer. Ces composants sont facilement échangeables sans modifier la structure du dispositif. Avec cette plate-forme, nous pouvons mesurer en parallèle l'énergie consommée par cinq composants du nœud.

Le nœud choisi est composé de dispositifs commerciaux comme un μC ATmega328P, un module radio XBee Series 1 qui transmet l'information à une fréquence de 2.4 GHz suivant le standard IEEE 802.15.4 [4], et un accéléromètre ADXL345 comme capteur.

L'application choisie pour cette expérimentation est une application de récolte périodique de données où les nœuds envoient les informations après une période établie au coordinateur du réseau. Le coordinateur ne fait qu'écouter le canal radio constamment afin de récupérer les paquets d'information. Le programme du nœud prend une valeur du capteur lorsqu'il se réveille du mode veille tous les t_{WDT} secondes, où t_{WDT} représente le temps avant d'une interruption du Watchdog Timer (WDT) du μC . Cette valeur du capteur est enregistrée dans la RAM du μC et, une fois que N_{val} valeurs sont stockées, elles sont envoyées au coordinateur du réseau via le module radio. Dans ce programme, $N_{\text{val}} = 100$ et chaque valeur est codée sur 1 octet. Le module radio correspond au dispositif le plus gourmand en énergie. Il reste la plupart du temps en mode veille et il est réveillé par le μC toutes les N_{val} fois qu'une valeur est stockée en RAM afin d'envoyer le paquet avec l'ensemble des valeurs.

La Figure 2a) présente les courbes de courant en mA en fonction du temps pour les trois composants : μC en bleu, module radio en rouge et capteur en vert. La courbe verte de courant d'alimentation du capteur est imperceptible car il est très faible, de l'ordre de 140 μA . L'intervalle de temps noté 1 correspond au mode veille du μC ; en 2, le μC se réveille pour prendre une valeur du capteur; en 3, le μC réveille le module RF pour transmettre les valeurs stockées dans la RAM; en 4, l'envoi du paquet *Request-to-Send* (RTS) est effectué; en 5, une fois que le paquet *Clear-to-Send* (CTS) a été reçu par l'émetteur, le paquet d'information est transmis au coordinateur; et finalement, en 6, le module radio reçoit le *acknowledgement* (ACK) du coordinateur et retourne au mode veille.

Nous pouvons distinguer sur les intervalles 1 et 2 de la Figure 2a) un changement évident de niveau de courant sur la courbe du microcontrôleur. Rester en mode veille de tous les composants du nœud est essentiel pour atteindre minimiser l'énergie consommée. Cependant, il faudra trouver un compromis entre la durée de ces périodes de veille et la disponibilité du capteur (à définir selon l'usage). Cette relation entre l'optimisation de l'énergie et la performance du système sera exposée en Section 3.

Après avoir mesuré les valeurs de courant, elles sont analysées d'une façon automatique par l'algorithme présenté à la Section 2.

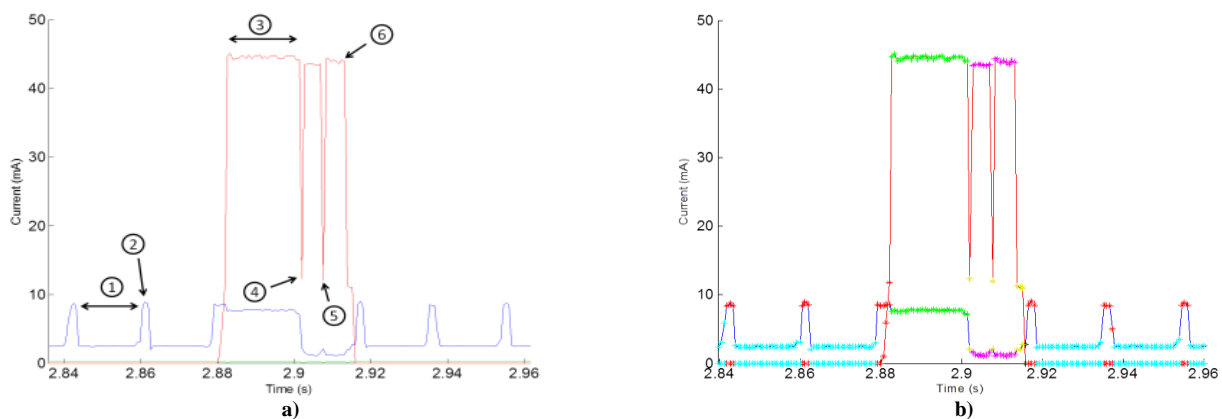


Figure 2 : a) Valeurs de courant par composant; b) et après la classification.

2. Modèle automatisé de la consommation d'énergie

Un algorithme a été développé afin de créer automatiquement un modèle de la consommation de l'énergie à partir des mesures d'énergie. Cet algorithme est basé sur plusieurs méthodes statistiques d'analyse du signal qui segmentent les données et classifient les états des courants selon leur niveau et leur durée. Après segmentation, les différentes données sont regroupées selon leur ressemblance. Cette méthode est basée sur l'Analyse en Composantes Principales (ACP) [5], qui réduit la dimension des données afin de les analyser plus facilement, et sur la Classification Ascendante Hiérarchique (CAH) [6], qui appartient au champ statistique du *clustering*. La classification est effectuée à partir des distances euclidiennes entre les points des *clusters*. Le nombre de classes est aussi déterminé automatiquement à partir d'un autre algorithme. Une fois les classes identifiées, les valeurs moyennes de courant et de temps pour chaque classe sont calculées. Une chaîne de Markov est créée avec les états et la matrice de transition estimée à partir des données. La chaîne de Markov nous permet de calculer l'énergie consommée et de prédire la durée de vie du nœud pour le même matériel, le même logiciel et quand les conditions du canal radio restent identiques à celles de l'expérimentation. Nous sommes capables de modifier les paramètres de la chaîne de Markov pour émuler une nouvelle situation (changement du matériel, du logiciel ou du canal) et estimer la nouvelle durée de vie. De cette manière, ce modèle automatique de la consommation de l'énergie aide à l'optimisation des ressources du nœud pour prolonger sa durée de vie.

Sur la Figure 2b), nous observons les courants de la Figure 2a) après la classification automatique pour les courants du μC et du module radio. Cinq classes ou états apparaissent : l'état 1, en bleu, représente le mode veille ; en rouge, l'état 2 correspond à la mesure de la valeur du capteur ; sur l'état 3, en vert, le μC transmet l'information au module RF ; en jaune, l'état 4 envoie le paquet de RTS et d'information ; l'état 5, en rose, correspond au temps entre l'envoi de deux paquets ainsi qu'à l'ACK reçu. Nous pouvons remarquer que les états identifiés par l'algorithme correspondent parfaitement aux intervalles identifiés sur la Figure 2a).

3. Résultats

Pour la prédiction de la durée de vie du nœud, nous avons choisi une batterie TCL PL-383562 polymer Li-ion de 850 mAh caractérisée par Chen et Rincón-Mora [7]. La tension sur les bornes de la batterie dépend clairement de la quantité d'énergie qui reste dans la batterie (nommé en anglais *State-of-Charge*, SOC). La relation de la tension offerte par la batterie et le SOC suit l'expression :

$$V_{OC}(\text{SOC}) = -1.031 \cdot e^{-35 \cdot \text{SOC}} + 3.685 + 0.2156 \cdot \text{SOC} - 0.1178 \cdot \text{SOC}^2 + 0.3201 \cdot \text{SOC}^3$$

La Figure 3 montre la fonction de la chute de la tension par rapport au SOC (la valeur SOC = 1 indique que la batterie est pleine, à 100 % de sa capacité, tandis que pour SOC = 0, la batterie se trouve totalement déchargée). Nous considérons que le nœud n'est plus opérationnel lorsque la tension sur la batterie descend au-dessous de 2.8 V. Pour le premier test, le temps du WDT a été choisi à sa valeur minimale pour une fréquence d'horloge de 16 MHz, soit $t_{\text{WDT}} = 16$ ms. Avec ces paramètres, la durée de vie du nœud pour cette expérience dépasse légèrement les 9 jours.

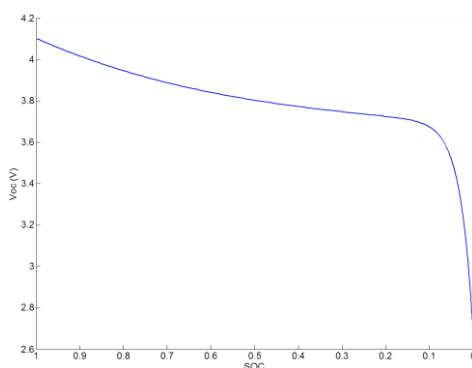


Figure 3 : Tension aux bornes de la batterie (V_{oc}) par rapport au State-of-Charge

Le WDT configuré sur le programme du μC est de 16 ms et cette valeur a été correctement évaluée par l'algorithme avec un mode veille (état 1) durant 15.5 ms en moyenne. Néanmoins, il existe de nombreuses applications, basées sur l'envoi périodique de données, où le temps de veille du nœud est supérieur à 16 ms. Des applications où le but est de connaître les caractéristiques environnementales (température, humidité, qualité de l'air, ...) d'un endroit, soit fermé, comme un bâtiment, ou extérieur, comme une ville, n'ont pas besoin d'une récolte de données avec une aussi courte période. Ces périodes peuvent se prolonger pour atteindre plusieurs secondes, minutes ou même plusieurs heures. D'autres applications comme la surveillance de la santé des infrastructures comme les ponts, les tunnels ou les murs des nouveaux bâtiments peuvent avoir des périodes de jours, semaines ou plusieurs mois. La durée de vie du nœud peut être prolongée si les périodes de courant minimal (mode veille) deviennent plus importantes. La Figure 4 montre la durée de vie estimée par le modèle automatique (courbe en bleu) et la durée de vie du même nœud obtenue par des tests réels

après avoir modifié le logiciel programmé sur le μC du nœud (courbe en rouge), pour les valeurs de WDT, $t_{\text{WDT}} = [0.016, 0.032, 0.064, 0.125, 0.25, 0.5, 1, 2, 4, 8]$ secondes, respectivement. Le Tableau 1 contient toutes les valeurs des durées de vie pour les tests et pour le modèle ainsi que les comparaisons en jours et en pourcentage entre chaque valeur obtenue. Sur la Figure 5, l'erreur de l'estimation par rapport aux mesures réelles est présentée. L'erreur moyenne est limitée à 0.073 jours, soit $\pm 0.6\%$.

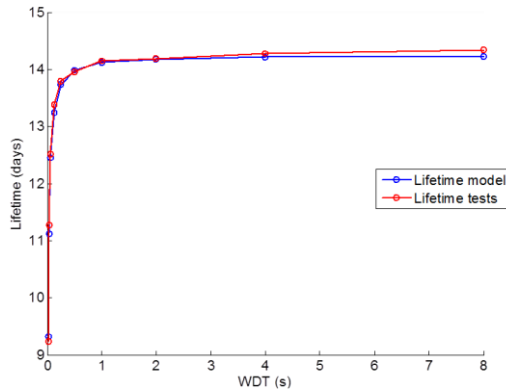


Figure 4 : Durée de vie du nœud par rapport au WDT

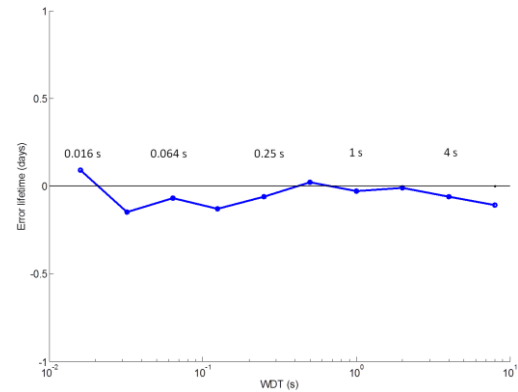


Figure 5 : Erreur entre le modèle et les mesures réelles

WDT (s)	0.016	0.032	0.064	0.125	0.25	0.5	1	2	4	8
Durée modèle (jours)	9.33	11.13	12.45	13.25	13.73	13.98	14.12	14.18	14.22	14.23
Durée tests (jours)	9.24	11.28	12.52	13.38	13.79	13.96	14.15	14.19	14.28	14.34
Différence (jours)	0.09	-0.15	-0.07	-0.13	-0.06	0.02	-0.03	-0.01	-0.06	-0.11
Différence (%)	0.97	1.32	0.56	0.97	0.43	0.14	0.21	0.07	0.42	0.76

Tableau 1 : Valeurs et comparaison modèle - tests réels de la durée de vie du nœud par rapport au WDT

Grâce à ce modèle nous pouvons obtenir facilement (sans avoir besoin de reprogrammer le nœud) les résultats de la Figure 4 et conclure que, pour cette expérimentation, la durée de vie du nœud n'augmente pas significativement à partir de $t_{\text{WDT}} = 1$ s. C'est la raison pour laquelle nous devrions programmer le nœud avec un $t_{\text{WDT}} = 1$ s pour avoir une bonne relation optimisation d'énergie – performance de l'application.

4. Conclusion

La mesure de la consommation de l'énergie d'un nœud de réseaux de capteurs, dans son environnement de fonctionnement, est possible grâce à une plate-forme réalisée spécifiquement pour effectuer des mesures de courant, composant par composant. Un algorithme statistique basé sur le *clustering* analyse ces mesures et crée un modèle automatique de l'énergie basé sur une chaîne de Markov. Grâce aux données statistiques de courant et de temps et la probabilité de transitions sur la chaîne de Markov, nous pouvons calculer la durée de vie du nœud. Cette durée de vie a été estimée avec une erreur moyenne de $\pm 0.6\%$ après une comparaison entre différentes valeurs obtenues à partir du modèle et de tests réels. Avec ce modèle, nous comparons facilement l'efficacité énergétique d'un nœud de réseau de capteurs quand il est composé d'un matériel déterminé ou quand il est programmé avec un logiciel déterminé. Ce système pourra être utilisé afin d'optimiser l'énergie du nœud sur le matériel et sur le logiciel.

Remerciements

Ce travail a été soutenu par USR CNRS 3380 IRCICA, Lille, France.

Références bibliographiques

- 1- D. Evans. « The Internet of Things », Cisco IBSG, April 2011.
- 2- D. Hughes *et al.* « Energy Aware Software Evolution for Wireless Sensor Networks », WoWMoM, 2013.
- 3- S. Kellner *et al.* « Towards a Realistic Energy Model for Wireless Sensor Networks », WONS, 2008.
- 4- « IEEE Std. 802.15.4-2006 », IEEE, 2006
- 5- H. Abdi and W. J. Lynne. « Principal Component Analysis », Wiley Interdisciplinary Reviews : Computational Statistics 2.4, vol.2, no. 4, p. 433-459, 2010.
- 6- C. C. Bridges Jr. « Hierarchical cluster analysis », Psychological reports, 18(3), p. 851-854, 1966.
- 7- M. Chen and G. A. Rincón-Mora. « An Accurate Electrical Battery Model Capable of Predicting Runtime and I-V Performance », IEEE Transactions on Energy Conversion, vol. 21, no.2, June 2006.