

Adaptation dynamique de la qualité de service dans les réseaux de capteurs avec récupération d'énergie

Faycal AIT Aoudia, Matthieu GAUTIER, Olivier BERDER

Université de Rennes 1 - Laboratoire IRISA, 6 rue de Kerampont, 22 300, Lannion, France
faycal.ait-aoudia@irisa.fr, matthieu.gautier@irisa.fr, olivier.berder@irisa.fr

Résumé – L'alimentation par récupération d'énergie est une technologie prometteuse pour assurer la viabilité à long terme des réseaux de capteurs sans-fil. Pour être viable, un nœud doit adapter dynamiquement sa qualité de service (QoS) à l'énergie récoltée en utilisant un gestionnaire d'énergie (PM - Power Manager). Dans cet article, GRAPMAN (GRAdual Power MANager) est proposé pour un réseau alimenté par des sources d'énergie périodiques. Contrairement à la plupart des gestionnaires d'énergie, GRAPMAN vise à obtenir un débit constant, tout en maintenant un débit moyen élevé et la viabilité.

Abstract – Energy harvesting (EH) powering is a promising technology to insure long-term sustainability of Wireless Sensor Network (WSN). To be sustainable, a node must dynamically adapt its Quality of Service (QoS) to the harvested energy using a Power Manager (PM). In this paper, GRAPMAN (GRAdual Power MANager) is proposed for EH-WSN powered by periodic energy sources. Unlike most State-of-the-Art PMs, GRAPMAN aims to achieve consistent throughput, while maintaining a high average throughput and sustainability.

1 Introduction

Les nœuds d'un réseau de capteurs sont classiquement alimentés par des batteries individuelles qui fournissent une quantité finie d'énergie limitant la durée de vie du réseau. Pour de nombreuses applications, le remplacement des batteries n'est pas envisageable si elles sont déployées dans un environnement hostile ou si le réseau est très dense. Une approche prometteuse pour résoudre ce problème est de permettre aux nœuds d'être entièrement alimentés par l'énergie récoltée dans leur environnement [1, 2, 3, 4]. Chaque nœud est muni d'au moins un récupérateur d'énergie et de un ou plusieurs dispositifs de stockage d'énergie. Ces dispositifs de stockage tampon permettent aux nœuds de survivre aux périodes où l'énergie récoltée est pas suffisante pour assurer le fonctionnement du nœud.

Dans les réseaux de capteurs à récupération d'énergie, les gestionnaires d'énergie (PM - Power Manager) ont pour objectif d'atteindre la viabilité à long terme, qui est atteinte lorsque l'énergie récoltée est supérieure ou égale à l'énergie consommée. Le PM est responsable d'ajuster dynamiquement les performances du nœud selon l'énergie récoltée.

Le premier PM qui adapte dynamiquement le débit a été proposé par *Kansal et al.* [1]. L'énergie récupérée est prédite par un filtre EWMA (Exponentially Weighted Moving Average) à partir des valeurs d'énergie récupérée les jours précédents. Avec LQ-Tracker (Linear-Quadratic Tracker) [2], *Vigorito et al.* ont proposé d'adapter le débit en considérant l'état de charge de la batterie (SoC -State of

Charge). *Le et al.* ont proposé Wake up Variation Reduction PM (WVR-PM) [3]. Ils proposent de ne pas maintenir le SoC à une valeur constante mais d'économiser l'énergie lorsque celle-ci est présente pour les périodes où elle ne l'est pas.

Dans cet article, GRAPMAN (GRAdual Power MANager) est introduit, un nouveau PM pour les nœuds alimentés par des sources périodiques. GRAPMAN permet aux nœuds d'assurer la viabilité à long terme tout en maximisant la qualité de service (QoS). En outre, GRAPMAN permet aux nœuds d'avoir une QoS consistante, c'est-à-dire qui ne fluctue pas fortement avec le temps. Pour atteindre cet objectif, GRAPMAN estime le débit constant qui peut être fourni par le nœud dans un horizon de temps fini.

La Section 2 présente l'architecture du nœud ainsi que le modèle énergétique associé. GRAPMAN est présenté dans la partie 3 et est évalué dans la Section 4. La partie 5 donne les conclusions générales.

2 Architecture du nœud et modèle énergétique

L'architecture globale du nœud est donnée sur la Figure 1. Dans ce papier, nous étudions seulement le gestionnaire d'énergie garantissant la longévité et la QoS. Il est composé d'un prédicteur d'énergie récupérée et d'un estimateur du budget énergétique. GRAPMAN calcule donc à chaque cycle un budget énergétique qui sera ensuite alloué

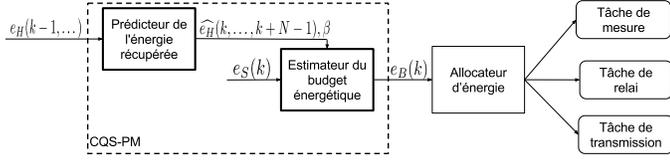


FIGURE 1 – Architecture globale du nœud.

aux différentes tâches du nœud (mesure, relai, transmission, ...). Les stratégies de répartition de l'énergie parmi ces tâches n'est pas traité dans ce travail.

Le temps est découpé en intervalles de durée T . GRAPMAN estime pour chaque intervalle k la quantité d'énergie qu'un nœud peut utiliser pour rester en vie. Ce *budget énergétique* est noté $e_B(k)$. Pour chaque cycle k , la conservation énergétique est décrite par :

$$e_S(k+1) = e_S(k) + e_H(k) - \frac{1}{\eta} e_B(k) - P_L T, \quad (1)$$

avec $e_S(k)$ le SoC au début du cycle k , $e_H(k)$ l'énergie récupérée au cours du cycle k , P_L est la puissance de fuite et $\eta \in]0, 1]$ un facteur lié à la conversion de puissance. De plus, la capacité de stockage est supposée finie, soit :

$$\forall k, e_S(k) \leq E_C, \quad (2)$$

avec E_C la capacité de stockage.

Afin d'assurer sa longévité, le nœud doit utiliser le budget énergétique e_B par cycle. La source d'énergie est supposée périodique de période H , tel que $H = N \times T$. Si N_{NE}^{max} est le nombre de cycle maximal sans énergie récoltée ($N_{NE}^{max} < N$), alors la capacité de stockage E_C doit permettre de garantir la viabilité du nœud en respectant la contrainte suivante :

$$E_C \geq N_{NE}^{max} \frac{1}{\eta} e_B + P_L N_{NE}^{max} T + E_{THF} + M, \quad (3)$$

avec E_{THF} le niveau d'énergie minimale pour que le nœud fonctionne et M une marge de sécurité.

3 Adaptation dynamique de la qualité de service

Cette partie présente GRAPMAN, un nouveau gestionnaire d'énergie qui fournit une QoS constante.

3.1 Prédiction d'énergie récupérée

GRAPMAN calcule au début de chaque cycle le budget énergétique que le nœud peut utiliser sur une période de la source tout en restant en vie. Comme l'énergie récoltée future n'est pas connue, un prédicteur est utilisé afin de l'estimer. L'énergie récupérée prédite au cours d'un cycle k est notée $\widehat{e}_H(k)$. Le prédicteur doit estimer l'énergie récupérée au cours de la période de la source. Le prédicteur introduit dans [1] est utilisé, il suppose que l'énergie présente à un instant donné est similaire à celle présente au

Algorithm 1 Détermine si un budget énergétique e_B est viable sur les N prochains cycles.

```

function ISSUSTAINABLE( $e_B$ ,  $e_S(k)$ ,  $\beta$ ,
 $\widehat{e}_H(k) \dots \widehat{e}_H(k+N-1)$ )
  sustainable  $\leftarrow$  True
   $i \leftarrow 0$ 
   $e \leftarrow e_S(k)$ 
  loop
     $e \leftarrow e + \beta \widehat{e}_H(k+i) - \frac{1}{\eta} e_B - P_L T$ 
    if  $e > E_C$  then
       $e \leftarrow E_C$ 
    end if
    if  $e < E_{THF} + M$  then
      sustainable  $\leftarrow$  False
      break
    end if
    if  $i = N - 1$  then
      break
    end if
     $i \leftarrow i + 1$ 
  end loop
  return sustainable
end function

```

même instant des périodes précédentes. L'énergie récupérée $\widehat{e}_H(k)$ est estimée par le filtre EWMA suivant :

$$\widehat{e}_H(k+N) = \alpha \widehat{e}_H(k) + (1-\alpha) e_H(k), \quad (4)$$

avec $e_H(k)$ l'énergie récupérée observée au cycle k et $\alpha \in [0, 1]$ est le poids du filtre.

Cependant le prédicteur EWMA n'est pas très précis lorsque l'énergie récupérée varie beaucoup. Un facteur correctif β est donc ajouté comme utilisé dans [5]. L'idée est d'utiliser des observations récentes de l'énergie récupérée afin d'ajuster les prédictions du filtre EWMA. β est calculé ainsi :

$$\beta = \frac{\sum_{i=1}^{N_C} e_H(k-i)}{\sum_{i=1}^{N_C} \widehat{e}_H(k-i)}, \quad (5)$$

avec N_C la taille de la fenêtre d'observation.

En utilisant l'énergie prédite (4), (1) peut s'écrire :

$$e_S(k+1) = e_S(k) + \beta \widehat{e}_H(k) - \frac{1}{\eta} e_B(k) - P_L T. \quad (6)$$

3.2 Estimation du budget énergétique

Un budget énergétique e_B est considéré viable pour les N prochains cycles s'il satisfait la contrainte suivante :

$$\forall i \in \{0, \dots, N-1\}, e_S(k+i) \geq E_{THF} + M, \quad (7)$$

avec k le cycle courant et M une marge de sécurité contre les erreurs de prédiction. L'Algorithme 1 est utilisé pour déterminer si un budget énergétique est viable.

L'Algorithme 2 montre la procédure d'adaptation du budget énergétique. Au début de chaque cycle k , le GRAPMAN teste le budget énergétique utilisé au cycle $k-1$ avec

Algorithm 2 Algorithme principal de GRAPMAN

Input: $e_B, e_S(k), \widehat{e}_H(k) \dots \widehat{e}_H(k + N - 1)$
survive \leftarrow ISSUSTAINABLE($e_B, e_S(k), \widehat{e}_H(k) \dots \widehat{e}_H(k + N - 1)$)
if survive = **True** **then**
 if Has not survived previously **then**
 $\Delta e_B \leftarrow$ Default value of Δe_B
 end if
 $e_B \leftarrow \min\{e_B + \Delta e_B, \text{Maximum energy budget}\}$
 survive \leftarrow ISSUSTAINABLE($e_B, e_S(k), \widehat{e}_H(k) \dots \widehat{e}_H(k + N - 1)$)
 if survive = **False** **then**
 $e_B \leftarrow$ Previous value of e_B
 end if
 $\Delta e_B \leftarrow \min\{\Delta e_B \times 2, \text{Maximum value of } \Delta e_B\}$
else
 if Has survived previously **then**
 $\Delta e_B \leftarrow$ Default value of Δe_B
 end if
 $e_B \leftarrow \max\{e_B - \Delta e_B, \text{Minimum energy budget}\}$
 $\Delta e_B \leftarrow \min\{\Delta e_B \times 2, \text{Maximum value of } \Delta e_B\}$
end if

l’Algorithme 1. Si le budget énergétique n’est pas viable, alors il est diminué. Sinon, il est augmenté tant que le budget énergétique obtenu est viable. Dans l’Algorithme2, Δe_B est le pas d’ajustement du budget énergétique. Afin d’améliorer la réactivité du système, Δe_B est augmenté exponentiellement si le test de viabilité de la ligne 1 retourne le même résultat successivement.

4 Evaluation

4.1 Conditions de simulation

Pour évaluer GRAPMAN, nous supposons que seule une tâche est exécutée par chaque nœud, elle consiste à faire une mesure et transmettre la valeur observée. C’est un scénario réaliste dans le cas d’une topologie en étoile. La QoS est évaluée par le débit du nœud. L’intervalle de réveil au cycle k , *i.e.* la durée entre 2 exécutions de la tâche, est notée $T_{WI}(k)$. Plus $T_{WI}(k)$ est petit, plus le débit est grand. Après chaque exécution de GRAPMAN, l’intervalle de réveil est déterminé par :

$$T_{WI}(k) = \frac{\overline{E}_{task}T}{e_B(k) - P_S T_S(k)}, \quad (8)$$

avec \overline{E}_{task} la consommation d’énergie moyenne de l’exécution de la tâche, P_S la puissance consommée par le nœud lorsqu’il est en veille et $T_S(k)$ la durée de veille pendant le cycle k . Dans l’hypothèse de faibles débits, $T_S(k)$ peut être approximé par T pour chaque cycle k .

Notre approche est comparée avec d’autres de l’état de l’art : les gestionnaires d’énergie *Kansal et al.* [1] (KAN-PM), WVR-PM [3] et LQ-Tracker [2]. Nous avons simulé

TABLE 1 – Consommation de la plateforme PowWow.

\overline{E}_{task}	P_S	P_L	η	E_C	E_{THF}	E_{THR}
2081 μ J	85.8 μ W	73 μ W	0.85	48.672 J	5.832 J	14.112 J

un système de récupération d’énergie photovoltaïque avec des relevés sur 100 jours issus de [6], qui correspondent à des mesures de radiances à l’intérieur d’un bâtiment. La surface du panneau photovoltaïque est fixé à 10 cm² et le rendement du panneau à 20%.

La source d’énergie a une période H de 24 heures. T est fixé à 30 min, il y a donc $N = 48$ cycles par période. De plus, comme effectué dans [1], α est fixé à 0.5. N_C est de 2. T_{WI} est compris entre [1s, 200s] avec une résolution de une seconde. Pour GRAPMAN, Δe_B est calculé pour avoir une variation de T_{WI} par défaut de 1 s et maximale de 16 s. Enfin, la marge M est de 5% de $(E_C - E_{THF})$, ce qui correspond à 2 J.

La plateforme simulée est la plateforme PowWow [7], la tableau 1 donne les consommations d’énergie de cette plateforme. E_{THR} correspond au niveau de charge pour une réactivation après une coupure d’énergie.

Dimensionnement du stockage Nous ciblons un intervalle de réveil de 5 s, ce qui correspond à un budget énergétique $e_B = 0.9036$ J. Ainsi, la durée maximale sans énergie récupérée est $T_{NE}^{max} = N_{NE}^{max}T = 14$ heures. En utilisant (3), E_C doit être supérieure à 41.28 J. La capacité de stockage de PowWow étant de 48.672 J, la viabilité du nœud doit pouvoir être assurée.

Les métriques utilisées pour comparer les gestionnaires sont le ratio de panne, noté R_f (correspondant au pourcentage du temps où il y a une panne de batterie), le temps de réveil moyen noté $\overline{T_{WI}}$ et son écart type $\sigma(T_{WI})$. La métrique $\sigma(T_{WI})$ permet d’évaluer la stabilité du débit.

4.2 Résultats

Tout d’abord, la Figure 2 montre le comportement de GRAPMAN, LQ-Tracker et WVR-PM sur 4 jours de simulation. Pour des raisons de clarté, KAN-PM n’est pas montré. GRAPMAN présente le plus faible intervalle de réveil, c’est-à-dire le plus haut débit. En outre, GRAPMAN est capable de maintenir un débit stable par rapport à LQ-Tracker et WVR-PM. En effet, LQ-Tracker utilise une loi de contrôle qui vise à maintenir le SoC égal à une valeur fixe. Par conséquent, pendant les périodes où aucune énergie n’est récoltée, l’intervalle de réveil augmente progressivement. De son côté, WVR-PM économise une partie de l’énergie récoltée pendant les périodes où aucune énergie n’est disponible. Mais son système de gestion d’énergie connaît de fortes augmentations de l’intervalle de réveil lorsque l’énergie récoltée est faible au début et à la fin de chaque jour. L’utilisation d’un quantificateur em-

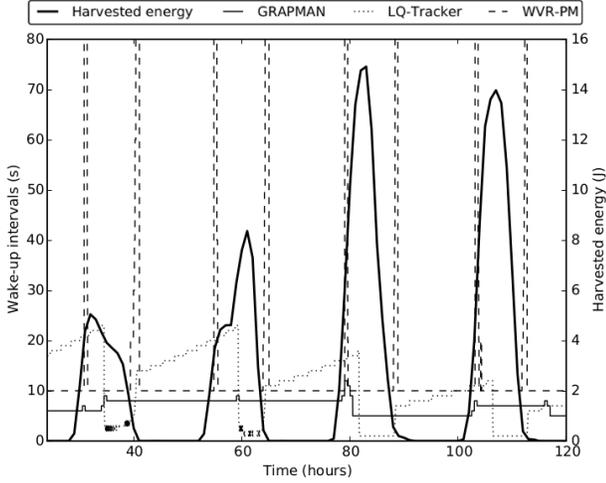


FIGURE 2 – Illustration du comportement de GRAPMAN, LQ-Tracker et WVR-PM sur 4 jours de simulation. Pour des raisons de clarté, l’axe T_{WI} est limité à 80 s, mais la valeur maximale autorisée est de 200 s.

TABLE 2 – Ratio de panne sur 100 jours.

PM	GRAPMAN	WVR-PM	LQ-Tracker	KAN-PM
R_f (%)	0.00	0.00	0.00	28.48

pêche WVR-PM de profiter de certaines augmentations de l’énergie récoltée, comme par exemple au cours des troisième et quatrième jours sur la Figure 2.

Les ratios de panne sont donnés dans le tableau 2. GRAPMAN, LQ-Tracker et WVR-PM atteignent 0% de panne sur 100 jours de simulation, ce qui signifie qu’il n’y a pas eu de coupure de batterie. Au contraire, KAN-PM a des pannes d’énergie parce que sa stratégie de gestion d’énergie ne prend pas en compte le SoC et sa réponse aux variations de l’énergie récoltée est lente.

Le tableau 3 donne le temps de réveil moyen et son écart type pour les différents PMs. GRAPMAN a des meilleures performances que les autres PMs en terme de débit moyen avec un gain allant de 32.33% par rapport à LQ-Tracker à 91.43% par rapport à KAN-PM. De plus, GRAPMAN permet d’obtenir un débit stable. Le tableau 3 montre que GRAPMAN a l’écart type le plus faible, avec un gain allant de 50.48% par rapport à LQ-Tracker à 93.60% par rapport à KAN-PM.

5 Conclusion

Ce document présente la conception et l’évaluation de GRAPMAN, un gestionnaire d’énergie pour les réseaux

TABLE 3 – Intervalle de réveil obtenu sur 100 jours.

PM	$\overline{T_{WI}}$		$\sigma(T_{WI})$	
	Valeur (s)	Gain (%)	Valeur (s)	Gain (%)
GRAPMAN	11.71	-	5.44	-
WVR-PM	21.35	45.14	40.97	86.73
LQ-Tracker	17.31	32.33	10.98	50.48
KAN-PM	136.75	91.43	84.96	93.60

de capteurs à récupération d’énergie. Ce PM est capable de fournir un débit élevé en moyenne tout en maintenant une faible variabilité du débit. GRAPMAN calcule pour chaque cycle de temps un budget d’énergie que le nœud peut utiliser pour rester durable. Des simulations sur des mesures sur 100 jours montrent que GRAPMAN est efficace à la fois en terme de débit moyen et de variance du débit.

Références

- [1] A. Kansal, J. Hsu, S. Zahed, and M.B. Srivastava. Power management in energy harvesting sensor networks. *ACM Transactions on Embedded Computing Systems (TECS)*, 6(4), Sept. 2007.
- [2] C.M. Vigorito, D. Ganesan, and A.G. Barto. Adaptive control of duty cycling in energy-harvesting wireless sensor networks. In *4th Annual IEEE Communications Society Conference on Sensor, Mesh and Ad Hoc Communications and Networks, SECON*, pages 21–30, June 2007.
- [3] Trong Nhan Le. *Global power management system for self-powered autonomous wireless sensor node*. PhD thesis, 2014. Under the supervision of Olivier Sentieys and Olivier Berder. University of Rennes 1.
- [4] T.N. Le, O. Sentieys, O. Berder, A. Pegatoquet, and C. Belleudy. Power manager with PID controller in energy harvesting wireless sensor networks. In *Green Computing and Communications (GreenCom), IEEE International Conference on*, pages 668–670, Nov 2012.
- [5] B. Buchli, F. Sutton, J. Beutel, and L. Thiele. Dynamic power management for long-term energy neutral operation of solar energy harvesting systems. In *Proceedings of the 12th ACM Conference on Embedded Network Sensor Systems, SenSys*, pages 31–45, New-York, USA, 2014.
- [6] Irradiance Datasets. <http://enhants.ee.columbia.edu/indoor-irradiance-meas/>, 2014. [Online; accessed December-2014].
- [7] PowWow : Power Optimized Hardware and Software Framework for Wireless Motives. <http://powwow.gforge.inria.fr/>, 2014. [Online; accessed December-2014].