



**HAL**  
open science

## Vers la neutralité énergétique des objets connectés

Maryline Chetto, Rola El Osta

► **To cite this version:**

Maryline Chetto, Rola El Osta. Vers la neutralité énergétique des objets connectés. CNRIUT'23 (Congrès National de la Recherche des IUT 2023), Jun 2023, Saint Pierre - Ile de la Réunion, France. hal-04110709

**HAL Id: hal-04110709**

**<https://hal.science/hal-04110709v1>**

Submitted on 30 May 2023

**HAL** is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

## Vers la neutralité énergétique des objets connectés

---

Maryline Chetto<sup>1</sup>

Rola El Osta<sup>2</sup>

maryline.chetto@univ-nantes.fr

rola.elosta@ul.edu.lb

<sup>1</sup> IUT de Nantes

Nantes Université, École Centrale Nantes,  
CNRS, LS2N, UMR 6004, F-44000 Nantes, France

<sup>2</sup> IUT de Saïda, Université libanaise

Laboratoire des Systèmes embarqués et en réseaux (LENS)  
BP 813 Saïda, Liban

**THÈMES** – *Informatique*

**RÉSUMÉ** – *Le présent article a pour objectif de décrire des contributions de recherche collaborative entre l'IUT de Nantes et l'IUT de Saïda au Liban. L'initiation de cette collaboration a été concomitante de celle d'un nouvel axe de recherche du LS2N centré sur les systèmes temps réel autonomes en énergie. Il se rapporte à la conception des infrastructures logicielles spécifiques pour assurer ce que l'on nomme la neutralité énergétique, en particulier dans les noeuds de capteur sans fil, principaux maillons de l'Internet des Objets. Par nos travaux, nous montrons notamment comment les stratégies d'ordonnancement temps réel peuvent impacter favorablement la neutralité énergétique, comment celles-ci peuvent éviter la famine d'énergie ou le gaspillage d'énergie et comment elles garantissent des résultats de calcul sous contraintes temporelles strictes.*

**MOTS-CLÉS** – *capteur sans fil autonome, récupération d'énergie renouvelable, temps réel, ordonnancement.*

## 1 Introduction

Les travaux de recherche menés conjointement par l'IUT de Nantes et l'IUT de Saïda ont démarré en 2009. Ils concernent le développement, l'évaluation de performance et la mise en oeuvre d'ordonnanceurs temps réel pour la gestion optimale de l'énergie ambiante servant à alimenter des capteurs sans fil totalement autonomes [1][2]. Ils ont été supportés dans la phase de démarrage par un PHC (Partenariat Hubert Curien). Celui-ci a permis d'assurer une collaboration avec une équipe de recherche alors émergente à Saïda. Quatre thèses de doctorat issues de cette recherche collaborative ont été soutenues conduisant à la création du laboratoire LENS (Laboratory of Embedded and Networked Systems) au Liban.

## 2 Capteurs et autonomie énergétique

On peut considérer que le réseau de capteurs sans fil constitue l'une des plus importantes technologies qui a donné naissance à l'Internet des Objets. En effet, notre société a un besoin accru dans ces dernières années d'observer, de mesurer et de contrôler des phénomènes physiques et biologiques. Cela concerne le domaine industriel pour le contrôle/commande d'un système de climatisation par exemple, le domaine de l'écologie et l'environnement pour la surveillance du taux de CO<sub>2</sub>, de la pression atmosphérique, de l'hygrométrie, etc. mais également celui de la santé pour le suivi à distance des patients par le recueil périodique de données physiologiques. Utiliser une pile ou une batterie pour alimenter un capteur suppose que celle-ci soit changée ou rechargée périodiquement. La maintenance engendre alors des coûts prohibitifs et peut s'avérer laborieuse voire impossible vu l'hostilité ou l'inaccessibilité du milieu dans lequel les capteurs sont déployés. Une nouvelle gamme de capteurs sans fil est entrain de naître, celle dite des capteurs entièrement autonomes [2]. Plutôt que d'intégrer une pile, ils tirent dans l'environnement, l'énergie requise pour leur fonctionnement. Cette technologie est connue sous le vocable "Energy Harvesting". L'architecture matérielle d'un dispositif autonome se compose de plusieurs blocs fonctionnels, comme représentés sur la Figure 1.

## 3 Contraintes temps réel

Les besoins en énergie d'un noeud de capteur sont réduits car il bénéficie des avancées d'une technologie de l'électronique dite du "low power" voire du "ultra low power". Il récolte des données en provenance de différents périphériques et ce, de manière cyclique. Le logiciel applicatif se compose ainsi d'activités périodiques souvent appelées tâches ou jobs qui doivent être exécutées dans le respect de contraintes temporelles (exprimées sous forme d'échéances) sous peine de ne pas disposer de données ex-

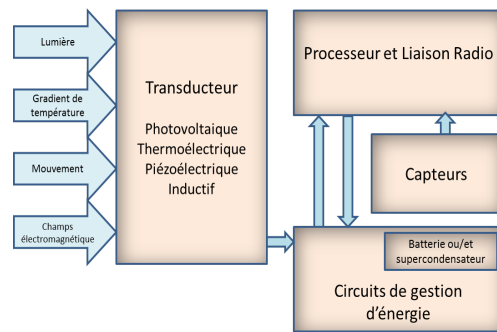


FIGURE 1 – Schéma d'un noeud de capteur autonome

ploiables. Le système doit s'appuyer sur un ordonnanceur adapté c'est à dire de type préemptif [1]. Le non-respect d'une contrainte comme l'envoi d'une donnée après une échéance pré-spécifiée peut avoir des conséquences catastrophiques sur l'application (pertes humaines, matérielles ou économiques).

## 4 Problématique de recherche

La question clé attachée à la gestion de l'énergie dans un capteur autonome ne se ramène pas à minimiser la puissance de consommation instantanée pour maximiser la durée de vie du dispositif comme dans les matériels portables traditionnels. Le problème revient à garantir un mode de fonctionnement qualifié d'«énergétiquement neutre» dans lequel à tout moment le dispositif ne consomme jamais plus d'énergie que celle récupérée. L'objectif scientifique principal de nos recherches est de proposer des stratégies d'ordonnement visant à faire le meilleur usage de l'énergie disponible tout en garantissant l'exécution temps réel de l'application embarquée. Concevoir un système embarqué autonome tel qu'un noeud de capteur sans fil signifie pouvoir garantir avant son déploiement un mode de fonctionnement qualifié d'énergétiquement neutre sans gaspillage ni famine. Une politique d'ordonnement détermine donc une planification en ligne de l'activité du processeur en calculant précisément les périodes d'oisiveté et les périodes de travail du processeur et ce, en plus d'ordonner les tâches temps réel selon leur urgence exprimée par une priorité. A noter que celle-ci pourra être fixe ou dynamique. En résumé, la question à laquelle nos travaux tentent d'apporter des réponses depuis dix ans peut se formuler comme suit : Comment déterminer les périodes d'oisiveté du processeur et comment ordonner le logiciel applicatif pour respecter perpétuellement les contraintes temporelles exprimées en termes de date de fin d'exécution au plus tard.

La Figure 2 illustre un ordonnancement temps réel optimal sensible à l'énergie qui ne doit pas être systématiquement ASAP (As Soon As Possible), non plus ALAP (As

Late As Possible).

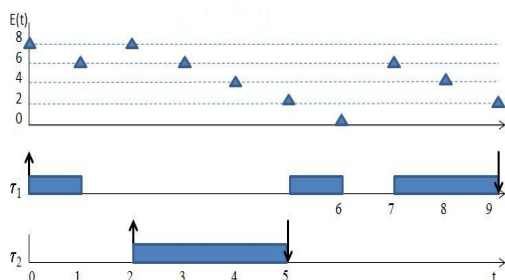


FIGURE 2 – Illustration d'un ordonnancement optimal

## 5 Aperçu des résultats

L'ordonnancement temps réel est une thématique de recherche dynamique et riche en résultats depuis les années 70. Malgré des avancées significatives, les spécificités des systèmes temps réel autonomes en énergie ne sont toujours pas supportées aujourd'hui par les ordonnanceurs temps réel intégrés dans les systèmes d'exploitation du commerce. De plus, la très grande majorité des travaux de recherche sur l'ordonnancement temps réel contraint par l'énergie visent à minimiser l'énergie consommée en vue de maximiser le délai qui sépare les recharges successives de batterie ou les changements de pile. Ils ignorent donc la problématique liée à un fonctionnement énergétiquement neutre. Les quatre thèses soutenues ont ainsi porté sur les problématiques suivantes :

1. La première contribution, issue de la thèse de H. El Ghor soutenue en 2009 définit un nouveau concept, la laxité énergétique, puis propose et valide par simulation, une heuristique d'ordonnancement appelée EDeg [3]. Celle-ci vise à assurer l'autonomie énergétique d'une plateforme monoprocesseur mono-fréquence.
2. Les travaux de la thèse de M. Abdallah, défendue en 2014 s'appuient sur le modèle dit "skip over" pour représenter un système soumis à des surcharges de traitement ou/et des pénuries temporaires d'énergie. Dans ce contexte, de nouvelles stratégies d'ordonnancement sont proposées, visant l'optimisation de la Qualité de Service définie comme le ratio d'échéances satisfaites.
3. Dans la thèse de N. Abdallah, soutenue aussi en 2014, les travaux s'inscrivent dans le contexte d'une architecture répartie constituée de plusieurs processeurs identiques [4]. On fournit des stratégies de partitionnement de tâches sous l'hypothèse que chaque processeur dispose de son propre réservoir d'énergie de taille donnée.
4. R. El Osta défend sa thèse en 2017 sur les systèmes temps réel autonomes qui supportent une mixité de tâches périodiques critiques et de tâches apériodiques non critiques [5]. On démontre l'optimalité d'un serveur

de tâches apériodiques au regard du temps de réponse moyen, spécifiquement adapté à la variabilité de l'énergie d'alimentation.

La collaboration entre nos deux IUT a très récemment été valorisée au travers de nouveaux sujets d'étude communs en lien avec l'autonomie énergétique des objets connectés. Nous pouvons citer :

1. l'ordonnancement de tâches temps réel sous contraintes de précedence [6],
2. l'ordonnancement de tâches temps réel sur une architecture munie de la technologie DVFS (Dynamic Voltage Frequency Scaling) [7].

## 6 Conclusion

Les travaux évoqués dans cet article portent sur les objets autonomes en énergie c'est à dire alimentés par une source renouvelable mais possiblement instable. La neutralité énergétique de ceux-ci passe par l'intégration de nouvelles approches d'ordonnancement et de gestion dynamique de puissance, objet de notre travail de recherche collaborative. Celui-ci se poursuit actuellement en s'intéressant aux architectures tolérantes aux pannes.

## Références

- [1] J. Liu *Real-Time Systems*; Prentice Hall, United States, 2000.
- [2] D. Ma, G. Lan, M. Hassan, W. Hu S. K. Das, *Sensing, Computing, and Communications for Energy Harvesting IoTs : A Survey. IEEE Communications Surveys and Tutorials*, 22(2), 1222-1250, 2020.
- [3] H. El Ghor, M. Chetto, R. Hage Chehade, *A real-time scheduling framework for embedded systems with environmental energy harvesting*. *Computer Electrical Engineering*, 37(4), pp. 498-510, 2011.
- [4] A. Queudet, N. Abdallah and M. Chetto, *KTS : a real-time mapping algorithm for NoC-based many-cores*. *Journal of Supercomputing*, 73(8), pp. 3635-3651, 2017.
- [5] R. El Osta, M. Chetto and H. El Ghor *Optimal Slack Stealing Servicing for Real-Time Energy Harvesting Systems*. *The Computer Journal* 63(10), pp. 1537-1546, 2020.
- [6] M. Chetto and R. E. Osta *Real-Time Scheduling of DAG Tasks in Self-Powered Sensors with Scavenged Energy*, 4th Int. IEEE Conference on Emerging Trends in Electrical, Electronic and Communications Engineering (ELECOM), Mauritius, pp. 1-6, 2022.
- [7] H. El Ghor and M. Chetto *Optimal Real-Time Scheduling Algorithm for Wireless Sensors with Regenerative Energy*, *The Computer Journal* 65(8), pp. 2087-2097, 2022.